PUBLICATION 40F

LES SERRES

Ministère de
l'Agriculture et
de l'Alimentation

ONTARIO

Jack Riddell, Ministre

91-05983/

LES SERRES

Préparé par

T.J. Blom, Institut de recherche horticole de l'Ontario, Station de Vineland, Ontario, L0R 2E0

F.J. Ingratta, Institut de recherche horticole de l'Ontario, Station de Vineland, Ontario, L0R 2E0

J. Hughes, Section de phytotechnie, Département d'horticulture, Université de Guelph, Guelph, Ontario, N1G 2W1

Traduction de "Greenhouses" Centre de ressources agro-alimentaires, Collège de technologie agricole et alimentaire d'Alfred.

Certaines appellations commerciales ont été mentionnées pour faciliter la compréhension de cette brochure, mais ceci ne signifie aucunement que nous recommandons les produits mentionnés, ni que nous critiquons de quelque façon ceux qui ne le sont pas.

TABLE DES MATIÈRES

		PAGE
1.	INTRODUCTION	5
2.	STRUCTURE DE LA SERRE	6
	CHOIX DE L'EMPLACEMENT	6
	TYPES DE SERRES	8
	MATÉRIAUX DE RECOUVREMENT	13
	COÛTS DE CONSTRUCTION	26
3.	CLIMAT DE LA SERRE	28
	CHAUFFAGE	28
	CLIMATISATION	33
	CIRCULATION D'AIR	38
	HUMIDITÉ RELATIVE	40
	GAZ CARBONIQUE	44
	LUMIÈRE ET ÉCLAIRAGE SUPPLÉMENTAIRE	45
4.	RÉGIE DU CLIMAT DE LA SERRE	49
	APPAREILS DE RÉGULATION	50
	APPAREILS DE MESURE	53
	ÉQUIPEMENT DE CLIMATISATION	56
5.	COÛTS ET REVENUS	57
6.	FOURNISSEURS POUR SERRES	59
7.	RÉFÉRENCES	63

PAGE

TABLES

Table 1. Surfaces en serres et valeur brute de production pour les principales régions productrices du Canada 6

Table 2. Transmission de la lumière (%) de matériaux de recouvrement rigides et souples 15

Table 3. Coefficients de transmission thermique pour quelques matériaux de serre 16

Table 4. Coût et longévité approximatifs de divers matériaux de recouvrement (prix 1985) 26

Table 5. Estimation des coûts de construction (1986) pour des serres jumelées de 1000 m² 27

Table 6. Teneur en eau de l'air à 18°C pour diverses humidités relatives 40

Table 7. Effet de la température sur la teneur maximum en vapeur d'eau de l'air (saturation) 41

Table 8. Rayonnement global mesuré à la station de Vineland (moyennes de 5 ans) 46

Table 9. Conversion de Watts par mètre carré (0,4 - 0,85 microns en pieds-chandelles, en lux, ou en micro Einsteins par mètre carré par seconde (0,4 - 0,7 microns) pour diverses sources lumineuses. 55

FIGURES

PAGE

Figure 1. Structure de bois recouverte de polyéthylène 8
Figure 2. Ventilateur centrifuge pour gonfler les deux épaisseurs de polyéthylène. 9
Figure 3. Serre indépendante double recouverte d'un double..... polyéthylène(charpente en métal de style gothique).... 10
Figure 4. Serres jumelées, avec polyéthylène double sur le toit et acrylique double (SDP) sur les murs. 11
Figure 5. Exemple de profilé autobloquant pour la fixation du polyéthylène. 12
Figure 6. Serres jumelées recouvertes de verre. 12
Figure 7. Vue en coupe de quelques panneaux de recouvrement à parois doubles ou triples 25
Figure 8. Exemple d'un conduit de chauffage servant aussi de monorail. 30
Figure 9. Système de chauffage au gaz de type atmosphérique .. 32
Figure 10. Système de ventilation par panneaux faîtiers doubles continus 35
Figure 11. Ventilateur à courroie, avec volets, couramment utilisé pour la ventilation des serres 36
Figure 12. Le filtre d'un système de refroidissement par évaporation 37
Figure 13. Système par convection et air forcé utilisant un tube de polyéthylène perforé pour la circulation de l'air et le premier stade de la climatisation. 38
Figure 14. Régulateur de la teneur en gaz carbonique 44
Figure 15. Thermostat dans une boîte ventilée, placé en un point représentatif 55
Figure 16. Appareil enregistrant les variations de température et d'humidité relative sur une base hebdomadaire 57

1. INTRODUCTION

Les serres ont été conçues pour permettre la production de plantes pendant les périodes où c'est impossible à l'extérieur. Historiquement, les serres étaient calculées pour laisser passer un maximum de rayonnement solaire. Ceci était particulièrement nécessaire sous les climats tempérés comme celui de l'Ontario à cause de la faible intensité lumineuse durant les mois d'hiver. Au début, la régulation de la température, de l'humidité relative, de la teneur en gaz carbonique et de la circulation de l'air dans les serres était primitive. Avec l'amélioration des méthodes de culture, il devint essentiel de mieux contrôler le climat de la serre. Le développement continuel de l'ordinateur et l'amélioration des structures vont maintenant permettre un meilleur contrôle du climat de la serre, donc, une plus grande productivité.

La construction d'une serre exige que l'on comprenne toute une variété de facteurs. Ainsi, pour la production très spécialisée de plantes, toutes les conditions doivent être maintenues uniformes en tout point de la serre. Il faut éviter toute zone froide insuffisamment ventilée qui aurait un effet négatif sur la croissance des plantes. De plus, il est important pour le serriculteur d'être prêt à adapter ses produits ou ses méthodes de culture pour répondre aux facteurs extérieurs tels que les importations, les coûts d'énergie, les nouvelles exigences du marché ou de nouvelles méthodes de culture comme les tables mobiles, la culture en substrat, la culture hydroponique sur film nutritif et l'éclairage supplémentaire.

L'industrie canadienne de la serriculture a connu une croissance de 19 % de la surface exploitée en serre au cours des cinq dernières années, mais l'augmentation de la valeur de production brute a été de 48 % (voir Table 1). En Ontario, l'augmentation de la valeur brute de production a été de 51 % de 1978 à 1983, avec une augmentation de 11 % de la surface en serre. En 1983, les serres de l'Ontario ont produit pour $34,8 millions de légumes et pour $135,1 millions de plantes ornementales, y compris les plants à repiquer. L'industrie de l'Ontario représente 60 % de la production canadienne et de la surface en serre. Il faut noter la perte de popularité des serres couvertes de verre: elles ont baissé de 74 à 64 % entre 1973 et 1983.

Table 1. Surface en serres et valeur brute de production pour les principales régions productrices du Canada.

	Surface (millions de m²)		Production brute (millions de $)	
	1978	1983	1978	1983
Ontario	2,26	2,50	112,3	169,9
Colombie Britannique	0,53	0,44	26,3	33,7
Québec	0,35	0,46	18,0	26,5
Alberta	0,17	0,52*	10,0	15,4
Man./Sask.	0,05	0,09	2,9	6,1
Maritimes	0,22	0,26	13,3	19,1
	3,58	4,27	182,8	270,7

Sources: Statistiques Canada, Rapport sur l'industrie des cultures en serre, 22-202.
** Source: Alberta Greenhouse Industry Survey - 1984.*

L'objectif de cette publication est de donner l'information de base sur les structures, les matériaux de recouvrement, le climat de la serre, les appareils de régulation et une idée du rapport coût/ revenu pour la culture en serre en Ontario. Les méthodes et les plans de construction dépassent le cadre de cette publication, mais on peut demander des renseignements auprès des spécialistes ou de certaines universités. Une liste de fournisseurs est proposée à la fin de la publication.

2. STRUCTURE DE LA SERRE

CHOIX DE L'EMPLACEMENT

Pour exploiter une serre avec succès, il faut commencer par tout planifier avec soin. Le choix d'un emplacement adéquat est de la plus haute importance étant donné qu'une fois installée, la serre sera rarement déplacée de son point d'origine. Considérer d'abord les facteurs suivants:

1. Distance du marché - Ceci est aussi important pour le producteur que pour le détaillant. Certaines plantes périssables, comme les roses, doivent être récoltées tous les jours alors que d'autres se récoltent tous les deux, trois ou quatre jours (chrysanthèmes, tomates et concombres). Il faut décider du genre de culture à entreprendre et évaluer les coûts de transport au marché par rapport aux coûts probablement plus élevés du terrain près des zones métropolitaines. Pour le producteur détaillant, la localisation près d'une route importante et la présence de concurrents sont à considérer. Par ailleurs, il est fort utile de se renseigner sur les perspectives

d'expansion de la ville voisine.

2. Accès aux services publics - La présence d'un conduit de gaz naturel à la limite du terrain est de la plus grande importance. Au cours des dernières années, le prix du gaz naturel est resté très avantageux par rapport au mazout et au propane. C'est un facteur important, étant donné les coûts annuels de chauffage ($80 000 à $200 000 par hectare pour 1985). L'accès à une source d'énergie de remplacement pourrait s'avérer déterminant dans l'avenir.

L'accès au courant électrique à une et trois phases est également important, d'autant plus que les serres sont de plus en plus souvent équipées d'appareils électriques tels que ventilateurs, châssis d'aération, systèmes d'éclairage supplémentaire, pompes de circulation, machines à empoter et même pompes à chaleur et déshumidificateurs.

Dans bien des régions du sud de l'Ontario où l'on n'a pas accès à de l'eau de surface (lac ou rivière), le serriculteur dépend d'un aqueduc municipal ou d'un puits. L'eau de ville, avec moins de 0,75 mS/cm de sels solubles, est généralement de qualité acceptable. Comme l'eau de puits peut être de très mauvaise qualité et ne pas convenir à une irrigation continue, l'eau doit être analysée et l'on consultera un spécialiste local. Là où il n'y aurait pas d'eau pour l'irrigation, il faudrait envisager une citerne ou un bassin pour recueillir et conserver les eaux pluviales. Il ne faut pas oublier que les besoins en eau pour une culture à l'année excèdent ce que pourrait recueillir le toit de la serre.

Donc, si l'on recueille dans une citerne l'eau pluviale du toit, on a besoin d'une source d'eau supplémentaire. La transpiration annuelle d'une culture dans une serre de verre est estimée à environ 800 mm d'eau, sans tenir compte des pertes.

3. Topographie. La topographie peut être un inconvénient aussi bien qu'un avantage. Un terrain plat facilite la construction et le déneigement, mais il risque aussi d'être exposé aux vents froids d'hiver. Pour les cultures à même le sol, comme les tomates, les concombres, les roses, les chrysanthèmes et les oeillets, il est bon d'avoir un sol bien drainé et ayant une bonne texture. L'amélioration du sol ou de la culture en substrat peut compenser pour la texture pauvre d'un sol, mais c'est souvent coûteux.

4. Grandeur. L'emplacement doit, si possible, être assez grand pour permettre une expansion future. La surface sous serre est en moyenne de 4000 m^2, mais il faut avoir un terrain plus grand. Il faut demander aux autorités municipales ou régionales tous les renseignements concernant les règlements de zonage, les règlements sur la construction, le Code de construction pour les bâtiments agricoles, les permis, etc.. L'orientation des serres dépend surtout de la configuration du terrain.

5. Disposition. La disposition de l'ensemble varie selon le choix que l'on fait entre des serres indépendantes et des serres jumelées. Les serres indépendantes sont très courantes pour l'emploi saisonnier (plants à repiquer, pépinière) et pour un accès facile aux camions ou les remorques. Elles permettent d'obtenir des climats différents et d'étaler facilement la construction. Les serres ne dépassent normalement pas 30 m de long et 6,5 m de large. Les serres jumelées ont de préférence une longueur de 60 à 65 m, avec une allée centrale de 2,5 à 3,5 m de largeur. Ainsi, la longueur des tables ou des couches n'excède pas 30 m, ce qui semble être la longueur optimale du point de vue de la productivité. Quand c'est possible, placer les ventilateurs sur le côté de la serre abrité du vent, le flux de la ventilation forcée étant parallèle à l'axe longitudinal des tables ou des couches. Du point de vue de la ventilation forcée, la longueur maximale de la serre est aussi d'environ 60 à 65 m.

TYPES DE SERRES

Il existe environ 10 fournisseurs principaux (Section 6) qui offrent un ou plusieurs types de serre. Dans cette section, nous allons voir les types de structure les plus courants.

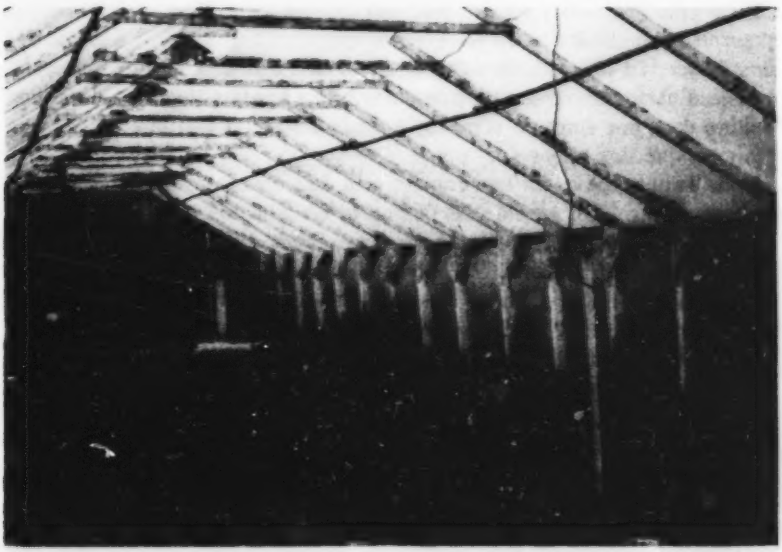


Figure 1. Structure de bois recouverte de polyéthylène.

Serres indépendantes

L'ancêtre de la serre de polyéthylène avait une charpente totalement en bois (Figure 1), conçue pour un film de polyéthylène de 12x30 mètres fixé au côtés et pignons avec des lattes de bois. Par la suite, on employa deux épaisseurs de polyéthylène pour réduire les coûts de chauffage. Un petit ventilateur centrifuge de 50 W (Figure 2) tenait les deux épaisseurs gonflées à une pression statique constante, une technique encore utilisée de nos jours. Ce genre de serre indépendante a perdu de sa popularité dû au fait que les parois des extrémités se déforment progressivement sous l'effet de la contrainte permanente créée par le plastique sous tension et à cause de l'humidité relative continuellement élevée dans la serre.

Figure 2. Ventilateur centrifuge pour gonfler les deux épaisseurs de polyéthylène.

Figure 3. Serre indépendante recouverte d'un double de polyéthylène (charpente en métal de style gothique).

Les serres de style gothique ou "quonset" (Figure 3) sont maintenant celles qui se vendent le plus. Elles sont utilisées surtout pour les cultures qui doivent passer l'hiver dans la serre (culture de plants de pépinière et de plants à repiquer). La charpente est constituée de nervures en acier galvanisé à chaud. Les largeurs sont de 5,5m, 6,1m, 6,4m, 7,3m, 8,2m, ou 9,1m pour correspondre aux largeurs commerciales des feuilles de polyéthylène.

On construit encore des serres indépendantes en verre en Ontario, principalement pour la production de plants de tabac.

Les serres à portées inégales qui ont été construites pour des projets d'énergie solaire (type "Brace") n'ont pas beaucoup de succès à cause de leur coût élevé, de leur faible coefficient de transmission de la lumière et de leur inefficacité générale du point de vue de la productivité de la main-d'oeuvre.

Serres jumelées

L'augmentation constante des coûts d'énergie et de main-d'oeuvre a poussé les producteurs à construire des serres jumelées (à toit à pans simples ou multiples) plutôt que des serres indépendantes. Ce genre de serre permet de réduire les coûts d'énergie, grâce à une réduction du rapport surface exposée/ surface au sol couverte, ainsi que les coûts de main-d'oeuvre, grâce à une réduction des distances à parcourir. Par ailleurs, il est plus facile de maintenir des conditions climatiques uniformes dans des serres jumelées que dans une serre indépendante.

Les structures jumelées sont plus sujettes au problème de surcharge dû à la neige et il faut donc les concevoir en conséquence. On peut, par exemple, faire fondre l'excès de neige dans les chéneaux à l'aide d'un conduit de chauffage supplémentaire placé le long de ceux-ci. Cette mesure s'est généralement avérée suffisante, même s'il arrive encore au verre de casser dans les cas extrêmes.

Il existe essentiellement deux types de serres jumelées:

1. Les serres voûtées ou gothiques, recouvertes de fibre de verre ou de polyéthylène double (Figure 4). Les serres voûtées existent en largeurs de 4,9 m, 5,5 m, 6,1 m, et 6,4 m pour être recouvertes de polyéthylène double (tube). Les serres gothiques sont généralement plus larges (11,0 et 12,8 m) et on les choisit pour obtenir une meilleure évacuation de la condensation sur la paroi intérieure, surtout près du faîte. On se sert de dispositifs autobloquants pour fixer le polyéthylène aux chéneaux et aux parois latérales (Figure 5).
2. Les serres traditionnelles à toit triangulaire (Figure 6). Tous les matériaux de revêtement sont utilisés, mais le verre et les panneaux de fibre de verre ou d'acrylique double sont les plus courants. Dans la majorité des cas, la pente du toit se situe entre 10,3 et 26,6 degrés (pente de 1:2). Les largeurs varient de 3,2 à 14 m. La portée des baies va de 3 à 3,7 m en fonction des limitations structurales. Pour les chéneaux, les poteaux, les chevrons et les pannes, on utilise des tubes extrudés ou roulés en acier galvanisé à froid ou à chaud. Pour les montants portant le matériau de revêtement, on emploie de plus en plus l'aluminium plutôt que le bois, de façon à réduire l'entretien et à augmenter la transmission de la lumière.

Figure 4. Serres jumelées, avec polyéthylène double sur le toit et acrylique double (SDP) sur les murs.

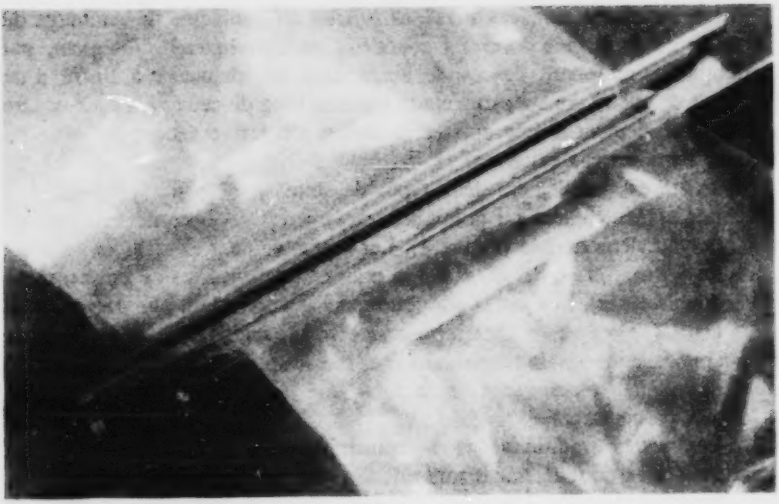


Figure 5. Exemple de dispositif autobloquant pour la fixation du polyéthylène.

Figure 6. Serres jumelées recouvertes de verre.

MATÉRIAUX DE RECOUVREMENT

Le choix d'un bon matériau de recouvrement est une décision difficile mais importante. Le problème, c'est qu'il existe un grand nombre de matériaux, chacun avec ses propriétés spécifiques. Ils exigent, pour la plupart, des systèmes de fixation spéciaux et, parfois, une charpente particulière.

C'est souvent le type de culture envisagé qui détermine le type de serre et de recouvrement. On sait bien que la croissance des plantes dépend dans une large mesure de la quantité de lumière qu'elles reçoivent. Certaines cultures, comme les roses, les oeillets, les chrysanthèmes et les concombres requièrent une grande intensité lumineuse durant l'hiver, alors que la lumière n'est peut-être pas aussi importante pour d'autres cultures, surtout celles de printemps comme les plants à repiquer. Les **propriétés optiques** ou caractéristiques de transmission de la lumière du matériau sont donc un critère de sélection important. Sachant que le facteur de transmission de ces matériaux (excepté le verre) tend à diminuer avec le temps, il faut être en mesure d'estimer leur performance sur 5 à 10 ans.

Puisque les serres sont chauffées pour produire à l'année longue, les **propriétés thermiques** sont importantes du point de vue du fonctionnement et de la rentabilité. Malheureusement, les matériaux qui isolent le mieux transmettent moins bien la lumière et entraînent une humidité relative plus élevée dans la serre. Il convient d'évaluer tous ces facteurs en tenant compte du type de culture envisagé.

Les serres ont aussi pour rôle de protéger les plantes des éléments tels que la neige, la grêle, le vent, le soleil ou le verglas. Il faut donc tenir compte dans chaque cas des **propriétés mécaniques** comme la capacité portante (neige), la résistance à l'impact (grêle), la résistance à la tension et au déchirement (vent, glace et neige), la résistance aux rayons ultraviolets (soleil), les propriétés électrostatiques (poussière), l'inflammabilité (feu), la résistance à la vapeur d'eau (condensation entre les deux parois transparentes), le poids et l'épaisseur (barres de support) et l'expansion thermique (type de barre de support). Il faut aussi tenir compte du coût du matériau et de sa longévité.

Dans les sections suivantes, nous allons étudier plus en détail ces trois séries de propriétés (optiques, thermiques et mécaniques).

Propriétés optiques

Aux latitudes du sud ontarien (42 à 44° N), on considère que c'est la quantité de rayonnement solaire pendant l'hiver qui limite la production. C'est pourquoi on y produit très peu de tomates et de concombres commercialement en décembre et janvier, alors qu'on produit certaines

fleurs de serre avec un éclairage supplémentaire. Il est donc important de tenir compte du facteur de transmission de la lumière des matériaux de recouvrement.

Bien des rapports contradictoires ont été publiés sur la transmission de la lumière par les divers matériaux. Les désaccords sont généralement attribuables à des différences dans les méthodes de mesure. On définit le facteur de transmission de la lumière comme étant le rapport entre le flux qui traverse le matériau et celui qui frappe la surface extérieure. Pour la croissance des plantes, une lumière dont la longueur d'onde va de 400 à 700 nM favorise la photosynthèse. L'intensité lumineuse s'exprime souvent en watts par mètre carré (W/m^2), ou en Einsteins par mètre carré par seconde ($E/m^2/s$) de rayonnement photosynthétique actif (RPA).

Les deux facteurs principaux qui déterminent la transmission du matériau sont l'indice de réfraction et la quantité de lumière absorbée par le matériau lui-même. Des calculs théoriques ont établi que, pour le verre, environ 4 % de la lumière est réfléchie à chaque interface verre/air; c'est-à-dire que le coefficient maximum de transmission pour une seule épaisseur de verre est de 92 %. Ceci explique pourquoi un matériau en deux épaisseurs transmet beaucoup moins de lumière que le même matériau en une seule couche dont l'épaisseur serait égale au total des deux autres. Le coefficient théorique maximum de transmission à travers deux parois de verre serait de 85 %, ce qui signifie que la principale cause de perte est la réflection et non pas l'absorption. Ceci explique aussi que la différence de transmission est relativement faible entre des films de polyéthylène de 100 et de 150 microns.

Un autre aspect important dans la transmission de la lumière est la distinction entre lumière directe et lumière diffuse. La lumière directe provient normalement d'une source unique (le soleil, par exemple), tandis que la lumière diffuse provient de directions diverses par réflection sur le sol et les particules dans l'air. La transmission à travers tout matériau de recouvrement est la plus élevée quand la lumière le frappe à angle droit (perpendiculairement). Si la lumière frappe la surface à un angle autre que 90 degrés, davantage de lumière est réfléchie et le facteur de transmission se trouve réduit. Voilà qui explique aussi pourquoi la lumière diffuse (temps nuageux) se transmet moins bien que la lumière directe. La table 2 donne quelques facteurs de transmission mesurés.

Table 2. Transmission de la lumière (%) du matériau de recouvrement, rigide et souple.*

	Perpendiculaire	Diffuse
Verre simple (4 mm)	89	83
Verre simple enduit d'oxyde d'étain (Hortiplus, 4 mm)	79	68
Verre double (16 mm)	81	71
Polyester renforcé (Fiberglass, avec revêtement de Tedlar)**	84	76
Acrylique (SDP, 16 mm)	84	75
Acrylique (trois couches, 32 mm)	78	65
Polycarbonate (Qualex, 6 mm)	77	68
Polycarbonate (Qualex, 8 mm)	70	64
Polyéthylène simple (180 microns, stable à l'UV)	87	77
Polyéthylène double (180 microns)	77	62
Acétate de vinyle éthylène (EVA - copolymère, 180 microns)	89	79
Polyester (Melinex, OW 175 microns)	85	78
Polyester (Melinex, 071-75 microns)	93	85
Fluorure de polyvinyle (PVF, Tedlar, 100 microns)	90	82
Fluorure de polyvinyle (PVF, Tedlar, 50 microns)	91	83
Polytétrafluoréthylène (PTFE, Teflon, 50 microns)	95	88
Chlorure de polyvinyle**	88	78

* *Source: IMAG, Wageningen, Pays-Bas, mesures sur matériaux neufs et secs seulement.*
** *Estimations.*

Noter que les facteurs de transmission s'appliquent à des matériaux neufs. Il est connu que le polyéthylène et la fibre de verre perdent de leur transmission avec le temps par suite de réactions photochimiques dans le produit. Cette détérioration est surtout causée par les rayons UV du soleil.

Par ailleurs, le flux lumineux au niveau des plantes n'atteint jamais les niveaux donnés à la table 2. D'autres éléments affectent aussi la transmission lumineuse: la structure (barres de support, chéneaux, conduits de chauffage), la condensation sur la paroi intérieure ou la poussière sur la paroi extérieure. Selon certaines études, les gouttelettes d'eau sur la paroi

intérieure peuvent réduire le taux de transmission de 10 %. Au niveau des plantes, il est fréquent que le niveau soit à 50 ou 70 % de la lumière ambiante.

Propriétés thermiques

La chaleur se transmet à travers un matériau par trois mécanismes: la conduction, la convection ou le rayonnement. Ces mécanismes distincts ont été étudiés plus en détail dans la Publication 65 du MAAO, "**Energy Conservation in Ontario Greenhouses**". L'effet total de ces mécanismes est représenté par le coefficient U de transmission thermique pour un matériau donné. Le coefficient U est mesuré dans des conditions normales de laboratoire et il faut le modifier pour les conditions réelles de la serre. Ainsi, certains facteurs comme la vitesse de l'air des deux côtés du matériau de recouvrement, la présence de surfaces radiantes (conduits de vapeur), les conditions climatiques (ciel clair ou nuageux) et la condensation sur la paroi intérieure sont uniques aux serres et affectent la valeur réelle de U (Table 3).

Table 3. Coefficients de transmission thermique pour quelques matériaux de serre.

Matériaux	Facteur U [W/(m²°C]
Verre, simple épaisseur, (3 mm)	6,45
Verre, deux épaisseurs, (espacement d'air de 6 mm)	3,70
Verre, trois épaisseurs, (espacement d'air de 6 mm)	2,66
Polyéthylène, simple épaisseur	6,53
Polyéthylène double, avec espacement d'air (est.)	5,0
Feuille de fibre de verre, plate	5,68
(ondulée, 15% de plus)	
Acrylique double (SDP-16 mm)	3,12
Coroplaste (polypropylène de 4 mm)	4,65
Verre et matelas à bulles (12 mm)	3,3

Malgré tout, le facteur U permet de comparer les matériaux de recouvrement et il donne une bonne indication de leurs propriétés isolantes. On voit, par exemple, qu'en séparant deux couches d'un matériau par un espacement d'air inerte, les pertes de chaleur sont plus basses que si les deux épaisseurs étaient collées ensemble (polyéthylène double par rapport au polyéthylène simple). De plus, l'influence du recouvrement et des systèmes de fixation qui lui sont propres sur le régime de renouvellement d'air dans la serre doit être considérée. Les échanges naturels d'air entre l'intérieur de la serre et l'extérieur n'entrent pas dans le facteur U, mais ils peuvent représenter une perte de chaleur importante pour la serre (10 à 20 %). Ainsi, une simple feuille de polyéthylène rend une serre plus étanche à l'air qu'un grand nombre de vitres.

Les pertes de chaleur dues à la ventilation dépendent directement de la vitesse du vent. Si la température extérieure est de -10°C ou moins, les échanges d'air se trouvent réduits du fait que la glace bloque les fissures. Le régime de changement d'air dans la serre a aussi un effet sur l'humidité relative (HR); quand l'air intérieur est remplacé par de l'air frais et sec de l'extérieur, le degré d'HR descend. Les variations d'HR sont particulièrement importantes pour la production à l'année longue. Si l'humidité est trop élevée, les feuilles des plantes deviennent molles et minces, ce qui risque de propager des maladies et limite l'absorption d'eau et d'éléments nutritifs par la plante en réduisant la transpiration. Ce même raisonnement est valable pour les apports de gaz carbonique et sa dilution; les serres de polyéthylène exigent moins de gaz carbonique supplémentaire que les serres de verre pour maintenir un niveau de 800 à 1000 ppm.

Les pertes de chaleur par rayonnement sont le troisième facteur affectant les caractéristiques isolantes totales de la serre. Toute surface produit et reçoit un rayonnement électromagnétique, la quantité de rayonnement dépend de sa longueur d'onde. Le rayonnement émis par le toit de la serre, les conduits de vapeur, les tables, etc. varie essentiellement de 5 000 à 20 000 nM et on l'appelle rayonnement thermique ou infrarouge (IR).

Le rayonnement IR est transmis, absorbé ou réfléchi. Le polyéthylène transmet un taux relativement élevé (80 %) de rayons à grande longueur d'onde, alors que le verre en transmet si peu (4 %) qu'on le considère comme opaque au rayonnement IR. Plus le matériau réfléchit le rayonnement IR, plus il est efficace pour la serre. Cependant, les matériaux qui réfléchissent le mieux l'IR sont souvent aussi ceux qui réfléchissent la lumière visible. Pour les films de polyéthylène (films IR), on considère parfois que l'absorption des rayons IR est une bonne technique de substitution. Bien que le verre transmette peu (4 %) de rayons IR, il en absorbe beaucoup. Certains types de verre (Hortiplus) empêchent cette

dissipation d'énergie dans l'atmosphère grâce à une membrane à basse émission collée à l'extérieur du verre. Pour sélectionner le recouvrement, il faut donc bien comprendre le rôle de la réflection, de la transmission et de l'absorption (ou de l'émission) pour les ondes courtes (lumière visible) comme pour les ondes longues (infrarouge) du spectre lumineux.

Propriétés mécaniques

La construction des serres est régie par le Code canadien de construction des bâtiments agricoles (CNRC, 21312, 1983) qui détermine leur résistance aux contraintes structurales (charges mortes et charges vives) comme aux contraintes spécifiques à l'emplacement, telles que les charges de neige et de vent. Les charges mortes comprennent la structure et tout équipement permanent, tandis que les charges vives représentent le poids de plantes ou d'équipement temporaire. Les charges de neige affectent les producteurs ontariens chaque année. Dans le sud de l'Ontario, les normes de construction exigent un minimum de 75 kg/m^2 pour les charges de neige. Les accumulations de neige varient selon la direction du vent, sa vitesse, le taux de précipitation, la nature de la neige et la température extérieure. Les règlements municipaux peuvent donc dévier de la norme ci-dessus en fonction des conditions climatiques. Les serres jumelées devraient être munies de conduits de chaleur auxiliaires longeant les chéneaux pour y faire fondre la neige. Pour les serres recouvertes de verre, c'est la géométrie de la serre qui a une grande influence sur la charge de neige. Les serres jumelées à longue portée (>7,5 m de largeur), dont le faîtage est élevé et dont les barres de support sont en aluminium sont celles qui souffrent le plus des tempêtes de neige dans le sud de l'Ontario. De grandes quantités de neige peuvent s'accumuler dans les chéneaux et la fonte de la neige autour des barres de support en aluminium font que la neige repose directement sur le verre. Les charges de neige excessives brisent généralement le verre plutôt que la charpente. Par ailleurs, le verre trempé, que l'on emploie souvent pour les charges de neige élevées, peut nécessiter une structure résistant à de plus fortes contraintes.

Dans le cas de films de plastique gonflés, le poids de la neige met les deux épaisseurs en contact, ce qui réduit leur pouvoir isolant et accélère la fonte de la neige. Il faut toutefois considérer dans la conception d'une serre pour une région spécifique, la capacité portante élevée du film de polyéthylène sous une charge. Du fait de leur haute valeur isolante, les panneaux rigides doubles en verre ou plastique, peuvent provoquer une accumulation néfaste de neige. Les manufacturiers recommandent souvent un espacement optimal pour les barres de support, qu'il faut respecter pour conserver la garantie. Avec les films, un dispositif autobloquant spécifique doit être utilisé; ce dispositif (d'aluminium ou de plastique) est

généralement destiné à une épaisseur précise de film (4x150 microns par exemple), ce dont il faut tenir compte quand on change l'épaisseur du film.

La résistance à l'impact détermine la résistance à la grêle. Dans les provinces de l'ouest, on emploie beaucoup la fibre de verre de préférence au verre. Le polycarbonate et la plupart des films résistent bien à la grêle. Par contre, dans le cas du verglas, une ou plusieurs minces couches de glace peuvent se former sur le toit qui risque alors d'être brisé par le vent. Ces lamelles de glace très coupantes peuvent endommager gravement le film recouvrant la serre, surtout la paroi extérieure. On effectue les réparations à l'aide d'un ruban spécial.

Matériaux utilisés

Une serre est une charpente recouverte d'un matériau transparent destinée à faire pousser des plantes. La croissance des plantes est influencée par la lumière (intensité et durée d'exposition), l'humidité relative (HR), la température et la teneur en gaz carbonique. Bien que la transmission lumineuse soit importante pour la croissance des plantes, le rôle de l'humidité relative et de la température est devenu plus évident maintenant que l'on a fait l'expérience de divers matériaux transparents. Le degré d' HR dépend dans une large mesure du système de renouvellement d'air dans la serre, tandis que la température des plantes est affectée par l'émission et l'absorption du matériau de recouvrement dans la bande infrarouge.

Verre. Traditionnellement, le verre est le matériau préféré pour les serres à cause de sa haute transmisson lumineuse et de sa longévité. Une vitre de 40 ans a presque la même transmission qu'une vitre neuve. On fabrique le verre en chauffant à 1500 °C un mélange de sable, de calcaire et de cendre de soude. On verse ensuite le liquide ainsi obtenu dans un moule de coulée plat pour obtenir l'épaisseur désirée et une surface plane (verre flotté). Le verre est ensuite refroidi et coupé aux dimensions requises. Les dimensions normales en Ontario sont de 610 x 660 mm, avec une épaisseur de 3 ou de 4 mm. La transmission habituelle du verre est de 88 à 90 % à un angle de 90°, les variations étant causées par des impuretés dans les matériaux d'origine. Le verre à faible teneur en fer (0,04 % Fe) offre la meilleure transmission lumineuse (Solatex).

Le verre avec une pellicule d'oxyde d'étain (Hortiplus) permet d'améliorer les propriétés thermiques de la serre en abaissant l'émission de 0,90 (verre normal) à 0,15. Les économies d'énergie que permet l'Hortiplus sont à leur optimum pendant les nuits claires, quand la surface extérieure du verre est sèche. Ces économies seraient de l'ordre de 15 à 20 % par rapport au verre ordinaire.

Le verre trempé est une autre forme de verre, dont les avantages sont d'ordre mécanique; ses propriétés optiques et thermiques sont les mêmes que celles du verre ordinaire, mais il est 4 ou 5 fois plus résistant. On l'utilise souvent pour les deux ou trois rangs inférieurs sur les toits de serres de 6 m de large ou plus, pour éviter les bris dûs aux charges de neige ou à de la glace glissant d'une pente adjacente (serres jumelées). Le verre trempé présente la particularité de pouvoir être posé sur des nervures légèrement incurvées. Le verre trempé ne se coupe pas et il doit être commandé sur mesure.

Il existe plusieurs types de verre à double paroi. Le plus commun est le verre "Sedo", d'Allemagne. C'est un panneau de 15 mm d'épaisseur: deux parois de verre de 3 mm séparées par un espacement de 9 mm; les côtés du panneau sont moulés et la cavité est remplie de gaz carbonique pur. Le produit se vend en six formats conventionnels et sa pose exige des supports spéciaux. Les économies d'énergie sont de l'ordre de 40 à 50 %.

Une des particularités du verre est son influence sur l'humidité relative dans la serre. Le joint par recouvrement entre les vitres simples permet à la condensation, qui se forme toujours sur la surface intérieure de la vitre, de s'écouler à l'extérieur jusqu'au chéneau. L'humidité relative se trouve encore réduite du fait du régime élevé de renouvellement d'air. Généralement, le taux de changement d'air est de 1 ou 2 volumes à l'heure, selon l'état de la structure et la vitesse du vent. On peut réduire considérablement les infiltrations d'air en scellant les joints au silicone, mais ceci amène inévitablement l'eau à dégoutter dans la serre faute de pouvoir s'échapper par les joints.

Plastiques. L'augmentation des coûts d'énergie, les risques de pénurie d'énergie à long terme et l'évolution de la technologie des plastiques ont contribué à une remise en cause du verre pour le recouvrement des serres. Bien des matières plastiques ont été inventées au cours des dernières années, mais toutes ne sont pas utilisables pour les serres. Celles que l'on peut employer se classent en deux groupes:

a. les films de plastique, dont le polyéthylène, les copolymères de polyéthylène et d'acétate de vinyle (EVA), le chlorure de polyvinyle, le polyester et le fluorure de polyvinyle.

b. les panneaux plastiques rigides, comme les panneaux renforcés de fibres de verre (FRP), les acryliques et le polycarbonate.

Films de plastique

Polyéthylène. Le polyéthylène (PE) est le film le plus largement employé dans les serres. On le produit en mélangeant des homopolymères d'éthylène avec un agent producteur contre les ultraviolets (UV). Selon l'agent protecteur utilisé, le film est vendu sur la base d'une longévité de

deux à trois ans pour une exposition normale. La plupart des fabricants nord-américains ajoutent un peu d'acétate de vinyle à leur polyéthylène, ce qui en fait des copolymères que l'on désigne par les initiales EVA. Les films EVA sont plus souples, plus résistants et ils absorbent mieux les rayons infrarouges que les films homopolymères.

Le polyéthylène est fabriqué par profilage: on injecte de l'air comprimé dans le polyéthylène pour former un tube d'une largeur allant jusqu'à 7,3 m, que l'on peut fendre pour obtenir une feuille simple. Les épaisseurs courantes sont 100 microns (4 mils) et 150 microns (6 mils).

Les films de polyéthylène pour serres sont résistants, souples et relativement bon marché. Ils résistent à des extrêmes de température de -30 à -50°C, mais ils fondent à partir de 80 à 90°C. Au dessus de 60°C, ils perdent beaucoup de leur force et peuvent s'allonger considérablement. Le polyéthylène de construction ne contient pas d'agent protecteur contre les UV et il se dégrade en trois à cinq mois par réaction photochimique. Tous les films pour serres résistent aux UV. Pour réparer les trous ou les fissures qui pourraient être causés par l'impact de la glace ou autres projectiles, il vaut mieux se servir de ruban de polyéthylène noir. Ne pas employer de ruban de vinyle plastifié.

Commercialement, on utilise rarement le polyéthylène en simple épaisseur à cause des problèmes continuels de condensation, sauf pour les cultures rapides de printemps, comme les plants à repiquer. C'est le polyéthylène gonflé, en deux épaisseurs, qui a le plus de popularité pour la production à l'année longue. Les films triples et quadruples ne sont pas employés à cause de leur faible transmission lumineuse, des difficultés de pose et des avantages économiques réduits des épaisseurs supplémentaires.

L'un des inconvénients des films est leur transmission élevée des rayons infrarouges, c'est-à-dire des rayons dans la bande de longueurs d'onde de 5 000 à 20 000 nM. Pour des conditions de serre idéales, il faut une transmission élevée de la lumière visible (400 à 700 nM) et une transmission faible des infrarouges. Les fabricants de serres ont récemment commencé à incorporer des filtres à infrarouge dans leurs produits pour réduire les pertes de chaleur. Les pellicules IR disponibles sur le marché absorbent 55 à 80 % des rayons infrarouges, ce qui peut représenter des économies de 15 à 20 % par rapport aux films ultraviolets ordinaires. Les produits couramment utilisés comme filtres à IR ne bloquent pas que les infrarouges; leur transmission lumineuse est inférieure à celle des films de polyéthylène ordinaires. La recherche fournira des renseignements supplémentaires sur la résistance de ces films, leur dégradation et leur transmission lumineuse.

La condensation est un autre facteur important dans les serres en polyéthylène. Le polyéthylène est considéré comme hydrophobe et la

vapeur d'eau se condense sur la surface intérieure en gouttelettes relativement grosses qui, en plus d'être gênantes, réduisent grandement (5 à 10 %) la transmission lumineuse. L'emploi d'un surfactant comme le Sunclear prévient la formation de gouttelettes en forçant l'eau à s'étaler en couche mince sur le polyéthylène. L'ingrédient actif du Sunclear n'est pas collé de façon permanente , mais seulement absorbé en surface, si bien que la condensation à l'intérieur finit par détacher et diluer le surfactant jusqu'à ce qu'il ne reste aucun élément actif. La dégradation du Sunclear est proportionnelle au taux de condensation. On a tenté d'ajouter le surfactant à la formule du film même, mais, jusqu'ici, les résultats n'ont pas été meilleurs que l'application à la main.

On gonfle les parois de polyéthylène double à une pression d'air correspondant à une colonne d'eau de 5 à 8mm. On devrait prendre l'air à l'extérieur pour limiter la condensation entre les deux films (Figure2). Comparés aux homopolymères, les films EVA ont une faible résistance à la vapeur d'eau et, avec le temps, celle-ci peut pénétrer entre les deux films, ce qui réduit la transmission lumineuse et peut provoquer la croissance d'algues.

L'accumulation de poussière sur les films de polyéthylène est fréquente et il est recommandé de les laver à l'aide d'un savon ou détergent doux.

Chlorure de polyvinyle (PVC). Semblables au verre, les polyvinyles ont un haut degré de transmission solaire. Les PVC traités contre l'UV résistent mieux à la dégradation que le polyéthylène. Ils peuvent durer jusqu'à cinq ans. Leur principal inconvénient est l'étroitesse des rouleaux disponibles: 1,25 à 2,20 m. Mais on peut les joindre à la chaleur pour obtenir des largeurs compatibles avec les barres de support. D'autre part, la charge électrostatique généralement associée aux vinyles attire la poussière sur le film. Les films de PVC sont très utilisés au Japon, mais elles n'ont pas la même popularité ailleurs dans le monde. Leur coût et leur faible résistance à l'impact à basse température sont des inconvénients majeurs.

Les panneaux de PVC rigides, à deux parois, comme le Thermolux, ne sont utilisés qu'à titre expérimental (Station de recherche d'Agriculture Canada, Harrow, Ontario). En Europe, ils sont vendus sous les noms de Maxolux ou Rodica. Les problèmes de dégradation et de résistance à la grêle font hésiter les producteurs.

Fluorure de polyvinyle (PVF). Le PVF s'emploie depuis des années dans les serres. Il offre une excellente longévité (10 ans) et une transmission élevée du rayonnement solaire. Sa résistance à l'impact (grêle) est excellente, mais sa résistance à la déchirure est faible. Il se vend en rouleaux de 1,2 à 1,8 m. C'est un film utile pour la paroi intérieure des serres et les

murs de séparation. L'appellation commerciale est Tedlar.

Polyester. Ce produit est très utilisé dans l'industrie du textile et certains pensent qu'il a beaucoup de potentiel pour les serres. Sa transmission lumineuse est comparable à celle du verre (Table 2) et il est très fort, bien que sa résistance à la déchirure soit faible. Il peut durer jusqu'à 15 ans. De nos jours, les films de polyester et de polyvinyle sont fabriqués avec une machine à calendrer, ce qui limite leur largeur à 1,5 m et les rend donc difficiles à employer pour les serres. Les films de polyester se vendent trois ou quatre fois plus cher que ceux de polyéthylène. Les appellations commerciales sont: Melinex OW, Melinex 071, Mylar et Llumar. La différence entre le Melinex OW et le Melinex 071 est que ce dernier contient un agent anti-buée et que sa transmission lumineuse est meilleure. Le Melinex 071 est donc un excellent choix pour une seconde ou une troisième épaisseur dans la serre, tant du point de vue de la conservation de l'énergie que de la déshumidification.

Panneaux rigides

Panneaux renforcés de fibre de verre. Ces panneaux sont constitués de polyester renforcé de fibre de verre (FRP). Ils sont très populaires dans les régions comme le sud des É-U, où l'intensité lumineuse est élevée. Des panneaux modifiés, contenant 15 % d'un additif acrylique et un revêtement de chlorure de polyvinyle pour ralentir la dégradation, ont amélioré la performance des formules polyester originales. Les panneaux de fibre de verre plus anciens ont posé beaucoup de problèmes de décoloration et de délamination.

Les panneaux de fibre de verre peuvent être plats ou ondulés; ils pèsent de 1,2 à 1,5 kg/m^2; les formats disponibles vont jusqu'à 1,2 m en largeur et 9 m en longueur. Ils sont garantis contre la dégradation mécanique naturelle seulement, pour une période allant jusqu'à 15 ans, selon la qualité du produit. Pour le toit, les panneaux ondulés ont l'avantage d'être plus rigides. Les ondulations augmentent la surface exposée, donc, les pertes de chaleur (10 à 15 %). Par contre, ils n'ont pas besoin de barres de support, puisqu'on peut les fixer directement aux chevrons et aux pannes. Les panneaux ondulés n'ont pas beaucoup de succès dans les zones plus froides, comme l'Ontario, mais on les emploie beaucoup en Colombie-Britannique. Les appellations commerciales courantes sont: Lascolite, Filon, Denverlight et Excelite.

Panneaux acryliques. Ce matériau est vendu depuis plus de 50 ans en épaisseur simple sous l'appellation Plexiglass. Sa transmission lumineuse élevée, sa grande flexibilité, sa résistance mécanique et sa longévité se comparent favorablement à celles du verre, mais son coût élevé a limité son usage pour le recouvrement de serres. "USS acrysteel" (3 mm) est une autre

marque de commerce courante.

Il existe un panneau à doubles parois en épaisseurs de 6, 8, 16 et 32 mm; l'Acrylite SDP 16, fabriqué en Ontario, est un de ces produits fréquemment employés. Les panneaux rigides ont 16 mm d'épaisseur et 1,21 m de largeur (Figure 7). Les divisions qui séparent les deux parois parallèles ont 16 mm d'intervalle. On ne doit pas les poser sur une charpente incurvée. Des barres de support spéciales permettent la contraction et l'expansion (7×10^{-5} cm/cm/°C) du panneau de 16 mm. Ce matériau devrait permettre des économies d'énergie de 40 à 50 % par rapport au verre simple ordinaire, mais les charges de neige sur une serre à grande portée peuvent devenir importantes si l'on ne prévoit pas un déneigement rapide. Les coûts relativement élevés et la nécessité d'employer des barres de support spéciales empêchent beaucoup de serriculteurs d'utiliser ce genre de panneau. Des essais sont en cours sur l'emploi de panneaux plus minces (8 à 10 mm) sur serres gothiques et voûtées. Il faut s'attendre, l'hiver, à des taux d'humidité relative plus élevés qu'avec le verre puisque les infiltrations d'air sont réduites, ainsi que le taux de condensation sur la paroi interne double. À part les économies d'énergie, il faut noter la bonne transmission lumineuse et la longévité. On emploie l'Acrylite SDP-16 pour les parois verticales (Figure 4) de presque toutes les nouvelles serres. Les appellations commerciales pour les panneaux à doubles parois sont: Acrylite SDP, Lucite, Exolite et AcryCel.

Panneaux de polycarbonate. Ces panneaux existent en feuilles à parois doubles comme, par exemple, "Qualex" et "SDP polycarbonate". Le Qualex, qui est relativement nouveau sur le marché, est de conception semblable à celle du SDP mais en plus mince et en plus souple (Figure 7). Le produit se vend en épaisseurs de 4 et de 6 mm. Le Qualex est moins cher que l'Acrylite-16 SDP.

Les panneaux de polycarbonate SDP ont le même format que ceux d'Acrylite SDP mais ils sont plus résistants et leur transmission lumineuse est plus faible. Leur expansion linéaire exige des barres de support comme celles utilisées avec les acryliques. Les prix sont environ 25 % plus élevés que l'Acrylite SDP. Les polycarbonates sont sensibles à la dégradation par l'UV. Les appellations commerciales courantes sont Lexan, Tuffak "twinwall", Qualex, PolyCel, Polygal et Cyrolon SDP.

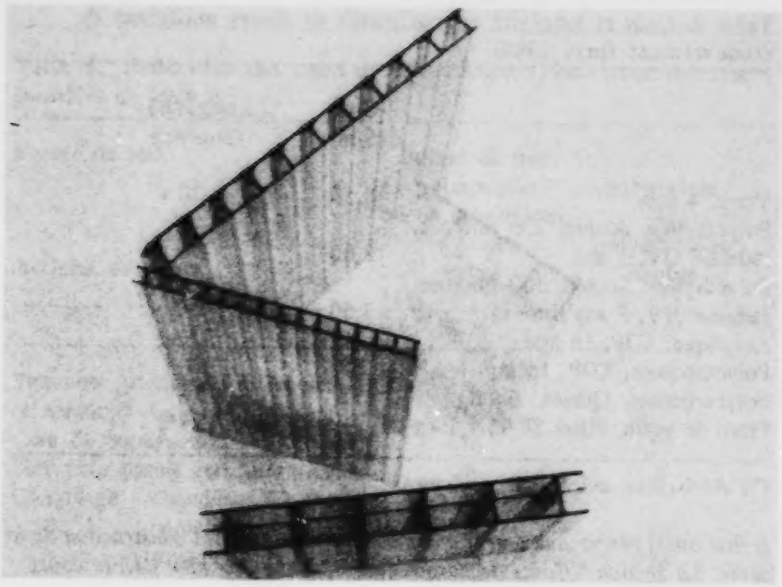


Figure 7. Vue en coupe de quelques panneaux de recouvrement à parois doubles ou triples.

Coroplaste. Ce panneau n'existe qu'en feuilles à parois doubles semblables aux produits SDP (Figure 7), de 5 mm d'épaisseur. Ils sont faits de polypropylène. On peut les visser ou les clouer à la charpente. Étant donné leur faible transmission lumineuse, on ne les emploie que pour les corridors. Leur longévité est d'environ 5 ans.

Coût et longévité de divers matériaux de recouvrement

La table 4 donne une estimation de la longévité et du coût de quelques matériaux de recouvrement.

Table 4. Coût et longévité approximatifs de divers matériaux de recouvrement (prix 1985)

	Coût ($/m²)	Longévité (années)
Verre, 4 mm	8,50	30 +
Polyéthylène double, 150 microns, stabilisé UV, 3 ans	2,00	2-3
Polyéthylène double, 150 microns, stabilisé UV, 3 ans filtre IR	3,50	2-3
Acrylique, SDP, 16 mm	30	15 +
Polycarbonate, SDP, 16 mm	38	10 +
Polycarbonate, Qualex, 6mm	12	5 +
Fibre de verre, Filon SP-15,1,5 kg/m²	9	15 (*)

(*) Résistance mécanique seulement

Il faut aussi penser aux autres coûts comme celui pour la construction de la serre. La section "Coûts de construction" donne une idée de ces coûts.

COÛTS DE CONSTRUCTION

Il existe bien des types de structures de serre et bien des possibilités pour l'intérieur de la serre. La table 5 démontre un sommaire des articles les plus courants. Les prix suggérés ont été établis pour une serre de 1000 m².

Table 5. Estimation des coûts de construction (1986) pour des serres jumelées de 1000 m²

Articles courants	Ferme de toit galvanisée ou en aluminium + verre	Ferme de toit galvanisée + polyéthylène double
	$/m²	$/m²
Structure (y compris revêtement et aération)	50-90	20-30
Coût de construction	16	10
SDP pour parois verticales - extra	8	8
Chauffage - chaudière (40 chevaux vapeur)	18	18
- tuyauterie et installation	23	18
Ventilateurs de circulation	2	2
Couverture thermique		
- à 50 %	15	15
- à 100 % (obscurité)	20	20
Éclairage supplémentaire HPS @ 40 W/m², installé	25-30	25-30
Système d'arrosage		
-goutte à goutte	6,5	6,5
-tubes spaghetti	4,5	4,5
-par aspersion	3	3
-irrigation (intermittente)	3,5	3,5
Bancs -fixes (métal galv.)	15	15
-mobiles (métal galv.)	20	20
Électricité -service et installation	4,5	4,5
-nouvelle entrée (extra)	10	10
Équipement-génératrice		
-huile	14	14
-climatiseur		

Autres coûts

1. Nettoyage et nivellement du terrain: $2 000
2. Salle pour la chaudière - salle d'emballage: $10 000. (7 à 8 % de la surface de la serre, à $135/m²)
3. Le recouvrement total en SDP coûterait environ $32 par m² de plus que pour du verre (installé).
4. Le chauffage à l'eau chaude coûte environ $1 de plus par m² que le chauffage à la vapeur.
5. Le coût du terrain n'est pas compris.
6. Une serre indépendante de 29,5 x 8 m, avec fermes galvanisées, paroi verticale de 0,9 m et polyéthylène double, coûterait $20/m² pour les matériaux. Pour des serres jumelées, en polyéthylène double, les autres coûts seraient comme ci-dessus.

Assurances

En plus du coût original en capital, le producteur doit ajouter les primes d'assurances applicables à son type de serre. La serre est assurée pour trois éléments: le matériau de recouvrement, la structure, l'équipement fixe (comme les ventilateurs et les lumières) et les plantes en culture. Selon la principale compagnie d'assurances sur les serres, la police d'assurances en vigueur en 1985 était du type suivant:

- Les matériaux de recouvrement tels que le verre, le SDP et la fibre de verre sont assurables au coût de remplacement. Le polyéthylène n'est pas assurable.
- La structure et l'équipement fixe peuvent être assurés au coût de remplacement. Le montant assurable minimum est de $45 par m² pour les serres de polyéthylène et de $90 par m² pour le verre.
- La valeur des plantes en culture est assurable à condition que la serre soit recouverte de verre, de polyéthylène double, de SDP ou de fibre de verre. On ne peut pas assurer les plantes dans une serre en polyéthylène simple.

3. CLIMAT DE LA SERRE

CHAUFFAGE

Dun point de vue technique, les serres sont mal isolées et il faut de grandes quantités d'énergie, surtout l'hiver, pour tenir la température à un niveau optimal pour la croissance des plantes. Pour obtenir une distribution uniforme de la température dans la serre, le système de chauffage doit être soigneusement planifié et conçu.

On peut calculer les besoins en chauffage d'une serre sur une base annuelle ou sur une base horaire. Il faut connaître les températures intérieure et extérieure, le type de matériau de recouvrement et la surface de la serre. On trouvera des exemples de calcul pour divers types de serres dans la Publication 65 du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Ontario, *"Energy Conservation in Ontario Greenhouses"*. Pour une différence de température de 35°C, on recommande généralement 350 W/m² pour une serre de verre et 270 W/m² pour une serre de polyéthylène double. Ces chiffres sont valables pour les grandes serres (4 000 m² et plus) et pour la plupart des régions du sud de l'Ontario. Les couvertures thermiques permettent de réduire ces chiffres de 25 à 35 %.

On choisira le système de chauffage en fonction des cultures envisagées et du recouvrement. Il existe trois façons distinctes de chauffer la serre.

Système de chauffage central. La chaleur est produite sous forme de vapeur ou d'eau chaude par une chaudière centrale. Les chaudières intégrées à convection forcée (tuyère) sont les plus courantes. Pour des raisons de flexibilité, la chaudière est souvent munie de brûleurs combinés, capables de brûler du gaz naturel comme du de l'huile. C'est l'eau qui assure le transfert de la chaleur et elle circule dans les conduits chauffants sous forme d'eau chaude ou de vapeur.

Dans la plupart des serres plus anciennes, les conduits de chauffage sont situés près des fermes du toit, à proximité de la zone où les pertes de chaleur sont les plus grandes et là où elles ne gênent pas le travail. De plus, on installe des conduits au périmètre de la serre pour compenser les pertes par les murs.

La vapeur à basse pression est le système préféré des serriculteurs. Toutefois, les plantes situées trop près des tuyaux supportent généralement mal la chaleur qui en émane. C'est pourquoi les serres fonctionnant à l'année longue sont parfois équipées de systèmes à eau chaude. Les chaudières à eau chaude sont des systèmes fermés qui exigent moins de produits chimiques pour le traitement de l'eau que la vapeur. Avec de l'eau chaude sous pression, on peut atteindre des températures de 110 à 120°C et les conduits de chauffage peuvent être situés n'importe où. Comme l'air chaud monte, on place les conduits de chauffage près du sol, surtout dans le cas de fleurs à couper ou de cultures sur table. On parle alors de chauffage au niveau des plantes. Dans des cas spéciaux, les conduits de chauffage peuvent servir à soutenir des tables mobiles ou à guider un monorail (Figure 8). Quand on cultive des plantes en pots à même le sol, ou quand les plantes cultivées exigent une température de sol plus élevée que la température de l'air, on enterre les conduits de chauffage. Les conduits sont alors généralement en polybutylène ou en polyéthylène. Les réseaux de chauffage supérieur et latéral fournit le restant des besoins thermiques. Le

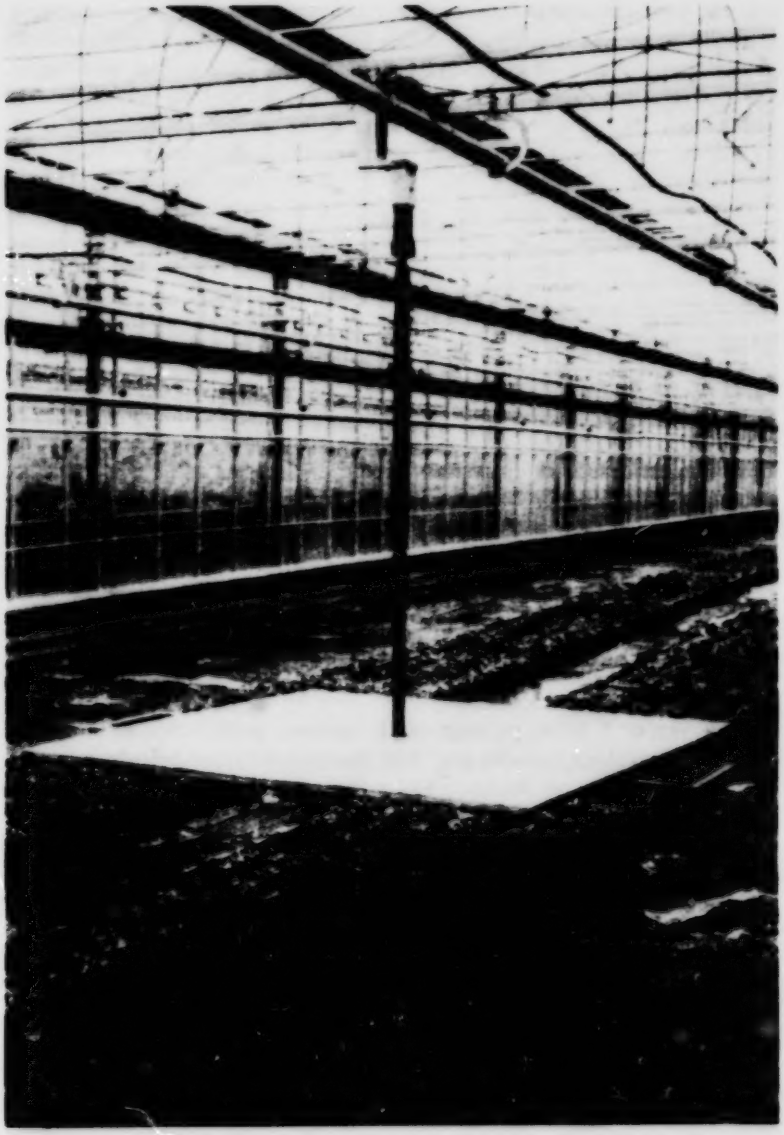


Figure 8. Exemple d'un conduit de chauffage servant aussi de monorail.

chauffage à eau chaude permet de contrôler, non seulement la température de l'air et du sol, mais aussi celle de l'eau. On n'utilise le système de chauffage à la vapeur que si la demande augmente soudainement (par exemple, chute de neige, ouverture des couvertures thermiques le matin ou stérilisation à la vapeur). Dans ce cas, on choisira une chaudière à vapeur avec un convertisseur (échangeur de chaleur vapeur/eau chaude) pour le système à eau chaude. Certaines chaudières à eau chaude peuvent être équipées de sorte à fournir de la vapeur pour la stérilisation du sol.

Bien que le rendement énergétique des chaudières à gaz ou à l'huile varie de 80 à 85 %, le rendement réel dans la serre n'est généralement que de 65 à 75 %, les systèmes à eau chaude étant généralement plus efficaces que ceux à vapeur. Une distribution uniforme de la chaleur et une bonne souplesse sont les principaux avantages du système de chauffage central.

Chauffage à air forcé. Les systèmes de chauffage au gaz (Figure 9) ont souvent la préférence des producteurs de récoltes saisonnières, surtout s'ils ont des serres de polyéthylène double. Ces systèmes ont un rendement énergétique plus bas (65 à 75 %) que les chaudières,mais leur installation est peu coûteuse. Leur principal inconvénient est une mauvaise distribution de la chaleur. On peut corriger ce problème à l'aide de ventilateurs. Une distribution uniforme de la chaleur est encore plus importante pour la production à l'année longue. Il vaut mieux avoir un grand nombre de petits systèmes de chauffage qu'un ou deux gros. Dans les serres jumelées, disposez alternativement les systèmes à l'un et l'autre bout de la serre et reliez-les à un circulateur d'air.

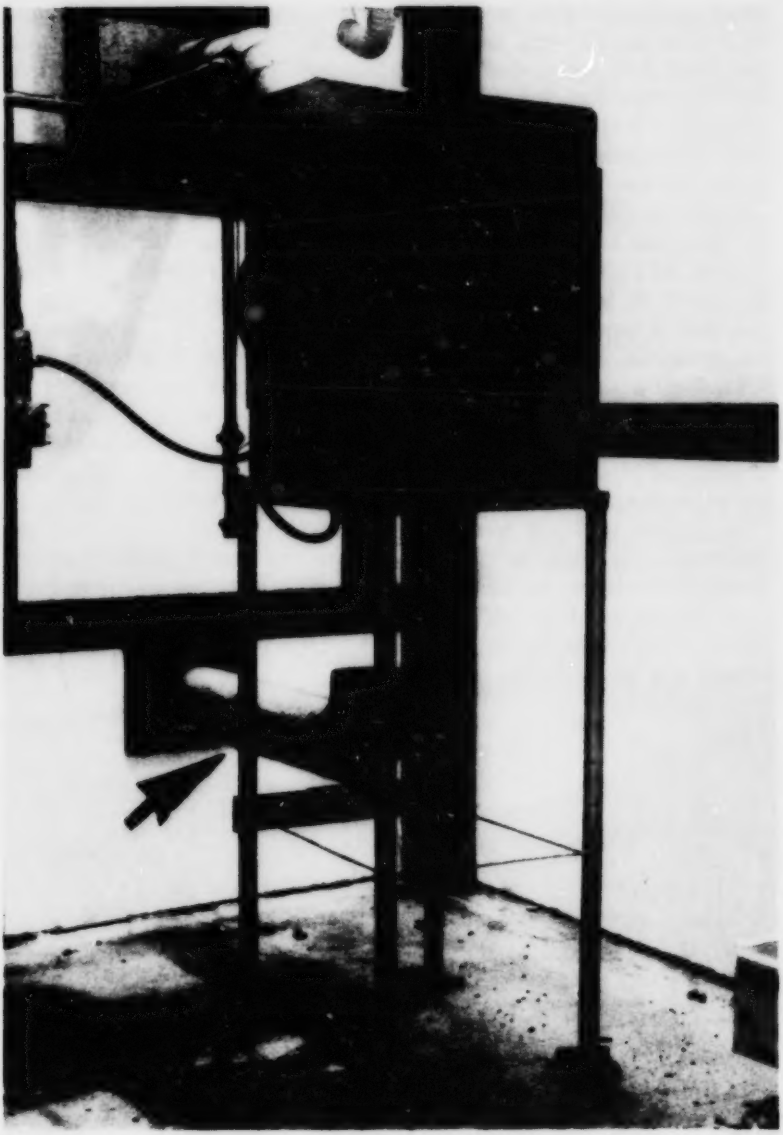


Figure 9. Système de chauffage au gaz de type atmosphérique. Noter l'arrivée d'air frais pour la combustion.

Un autre problème du système à air forcé est le risque de pollution de l'air par des impuretés ou par des gaz de combustion incomplète qui pourraient pénétrer dans la serre. Il faut prévoir une arrivée d'air frais pour les brûleurs, surtout dans les serres étanches à l'air. Prévoir une ouverture de 10 cm^2 par 1 000 W de capacité de brûleur. Les systèmes scellés, plus récents, sont dotés d'une prise d'air frais et ils sont plus efficaces. Toujours évacuer les gaz de combustion à l'extérieur de la serre. Vérifier régulièrement s'il n'y a pas de fissures dans l'échangeur de chaleur car des gaz de combustion et du gaz non consumé pourraient être aspirés dans la serre par le système de circulation d'air.

Chauffage infrarouge. Le chauffage des serres par infrarouge à basse intensité est une innovation récente. Les objets sont chauffés par le rayonnement émanant d'un tuyau chaud plutôt que par convection. Un tube d'acier noir, de diamètre extérieur de 10 cm, placé près du faîte de la serre, est chauffé par un ou plusieurs systèmes au gaz de 17 600 W, les gaz de combustion étant aspirés dans le tube par une pompe à vide disposée à l'extrémité du tuyau. La chaleur rayonnante émise par le tuyau est dirigée vers le bas par des réflecteurs, chauffant les objets sur son passage. Les gaz de combustion sont évacués à l'extérieur de la serre après avoir atteint le point de condensation. Tout ceci fait de ce système un excellent convertisseur de combustible en chaleur sensible.

Il est difficile d'obtenir une bonne distribution de la chaleur dans la serre et il faut étudier avec soin la disposition du système infrarouge, surtout pour les serres indépendantes. Les plantes plus "couvrantes" (roses, concombres) qui demandent davantage de chaleur peuvent connaître des problèmes de stratification de la température et de variations dans la maturité. Les brûleurs des systèmes actuels de chauffage infrarouge à basse intensité (Co Ray Vac) ne fonctionnent qu'au gaz naturel et au propane.

CLIMATISATION

Quand l'intensité solaire est élevée, la température à l'intérieur de la serre monte plus haut que le niveau ambiant par suite d'un gain thermique net et d'une diminution de la circulation de l'air. La principale raison de l'élévation de température est l'impact pendant les mois d'été d'un rayonnement d'environ 17 000 kJ/m^2 par jour. Il faut donc faire baisser la température de l'air et des plantes dans la serre. On obtient ceci en combinant transpiration et ventilation.

Dans des conditions optimales, la température des plantes peut être modifiée par changement du taux de transpiration. Une culture de plantes adultes peut produire par transpiration jusqu'à 5 L/m^2 d'eau par jour, ce qui correspond à environ 12 500 kJ/m^2 de refroidissement par jour. Il faut extraire le reste de la charge thermique pour éviter que les températures

excessives ne réduisent la transpiration naturelle et la croissance des plantes.

La ventilation, le moyen traditionnel d'abaisser la température, s'effectue en aspirant dans la serre de l'air plus frais de l'extérieur. Il existe plusieurs méthodes de ventilation, qui diffèrent surtout par leur capacité de refroidissement. Quand on évalue les besoins en climatisation d'une serre, il est important d'estimer la charge thermique pour les différentes saisons. En voulant économiser, les producteurs installent souvent un système de ventilation incapable de répondre aux charges culminantes de l'été. La ventilation est nécessaire toute l'année. L'hiver, on l'utilise souvent pour abaisser l'humidité relative mais il faut réduire le régime pour éviter un refroidissement excessif.

Il existe trois systèmes différents qui ajoutent de l'air frais dans la serre pour abaisser la température. Chacun de ces systèmes a ses caractéristiques et le choix doit être fait en fonction des besoins.

Ventilation par convection à l'aide de panneaux au toit et/ou aux murs

La ventilation naturelle est la forme la plus ancienne de refroidissement. L'air circule sans assistance mécanique, sous le seul effet du vent et de la différence de températures entre l'intérieur et l'extérieur de la serre. Ces deux facteurs peuvent jouer un rôle important dans la circulation de l'air et ils sont normalement inséparables. Le taux de renouvellement d' air dépend aussi de la grandeur des panneaux ouvrants, de la durée d'ouverture, et de la direction du vent. Normalement, les panneaux ouvrants représentent 25 à 30 % de la surface du toit et ils sont distribués sur les deux pentes (Figure 10). S'il y a un vent dominant, on ne pose des panneaux que du côté sous le vent pour réduire les coûts de construction. Certains producteurs emploient la ventilation naturelle quand la climatisation exige peu de circulation d'air (automne, hiver, printemps) et ils font appel à la ventilation forcée durant l'été. L'ouverture des panneaux du toit doit être coordonnée de telle façon que ceux de la pente sous le vent s'ouvrent avant ceux de la pente au vent. Les panneaux de chaque côté du toit sont généralement reliés à une tige de commande par une crémaillère. L'ouverture et la fermeture sont effectuées par un moteur réversible (3 phases) relié à la tige de commande. Certaines serres indépendantes sont climatisées par convection seulement, au moyen de panneaux ouvrants latéraux et faîtiers.

Figure 10. Système de ventilation par panneaux faîtiers doubles continus.

Pour les serres à toit rigide (verre, acrylique SDP), la climatisation s'effectue ordinairement à l'aide de panneaux au toit. On trouve même parfois des panneaux sur les toits de serres gothiques en polyéthylène.

Climatisation forcéee avec volets et ventilateurs

On utilise principalement ce système pour le refroidissement pendant les grandes chaleurs, surtout dans les serres non pourvues de panneaux au toit (polyéthylène). La ventilation est provoquée par des ventilateurs électriques insérés dans le mur à une extrémité de la serre, l'air frais se trouvant aspiré par des volets situés dans la paroi opposée. Les ventilateurs et les volets sont disposés de 0,5 à 1,5 m du sol, selon le genre de culture. On se sert le plus fréquemment de ventilateurs à courroie, à basse vitesse et grande capacité (Figure 11), parce qu'ils sont silencieux et peuvent déplacer de grands volumes d'air à faible vitesse. On trouve des ventilateurs à prise directe plus petits (moins de 60 cm de diamètre), avec moteurs à vitesse unique ou variable. Les ventilateurs à prise directe sont sujets aux vibrations et à des contraintes de poussée, si bien qu'ils ont tendance à demander plus d'entretien. Les fabricants offrent une gamme complète de ventilateurs, dont les diamètres vont de 0,6 à 1,4 m, par intervalles de 0,15 m. La capacité d'un ventilateur à déplacer l'air est généralement exprimée en mètres cubes par heure. Si les ventilateurs de serre doivent fonctionner beaucoup, il est

bon de comparer le coefficient d'efficacité de ventilation (rapport capacité/ unité d'énergie consommée) des différents ventilateurs.

Figure 11. Ventilateur à courroie, avec volets, couramment utilisé pour la ventilation des serres.

Les volets placés à la sortie du ventilateur pivotent sous l'effet de la pression et n'ont généralement pas besoin de moteur. On recommande ordinairement une capacité de ventilation d'environ un volume d'air par minute, soit 2,5 m^3 d'air par m^2 de surface au sol. S'il doit y avoir deux ventilateurs ou plus, ne pas les espacer de plus de 8 m afin que le mouvement de l'air soit uniforme dans la serre. Il convient, si possible, de les placer dans un mur d'extrémité, pour que l'air circule sur la longueur de la serre ou le long des tables de production.

Comme l'air se réchauffe en traversant la serre, la distance de la prise d'air au ventilateur ne doit pas être trop grande. Il est souhaitable de se limiter à 65 m. Au-dessus de cette distance, il se crée dans la serre des zones d'air plus chaud et plus froid. Les panneaux sont importants car ils influencent la vitesse de l'air qui entre dans la serre. Une vitesse élevée est particulièrement importante durant la saison froide, pour éviter les zones d'air froid près des ouvertures.

Pour certaines cultures, notamment celles qui exigent des températures plus fraîches l'été, il peut être avantageux d'installer un système de refroidissement par évaporation à l'entrée d'air. L'air est aspiré à travers des filtres que l'on tient toujours humides (Figure 12). On parle, pour désigner ce système, de climatisation avec coussin de refroidissement.

Figure 12. Le coussin d'un système de refroidissement par évaporation. Noter le tuyau d'arrivée d'eau et les gicleurs qui tiennent le coussin humide.

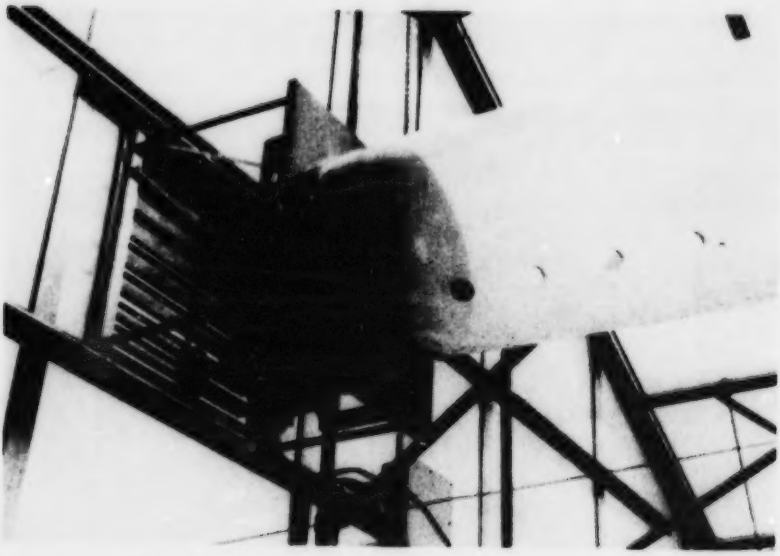


Figure 13. Système par convection et air forcé utilisant un tube de polyéthylène perforé pour la circulation de l'air et le premier stade de la climatisation.

CIRCULATEUR D'AIR

Ce système est constitué d'un ventilateur qui envoie de l'air sous pression dans une gaine de polyéthylène perforée et d'un volet d'admission d'air (Figure 13). La capacité du ventilateur doit être d'environ 0,4 à 0,6 m^3 d'air par m^2 de surface de serre au sol par minute. L'admission d'air se fait grâce à un volet sur ressort posé à l'extérieur et une buse posée à l'intérieur de la serre. Le volet, qui s'ouvre vers l'extérieur, peut être motorisé pour fonctionner automatiquement sous l'effet d'un thermostat ou d'un humidistat. Les volets sont toujours placés dans le mur de pignon, à la hauteur du chéneau. Ils sont généralement ouverts pour le premier stade de la climatisation. La buse comporte un manchon circulaire sur lequel vient s'insérer une gaine de polyéthylène perforée, de 45 cm ou plus de diamètre, et qui est suspendue par des broches sur toute la longueur de la serre. L'autre extrémité de la gaine est fermée avec une ficelle et reliée par un câble passant sur une poulie à un contrepoids qui permet à la gaine de s'allonger et de se contracter.

Les ventilateurs tournent normalement 24 heures par jour pour faire circuler l'air dans la serre. C'est la position des trous dans la gaine qui détermine la direction du courant d'air et l'on peut être amené à les déplacer pour ré-orienter le flux d'air. Le courant d'air doit frapper la paroi juste au-dessous du chéneau plutôt que le toit, ce qui entraînerait des pertes de chaleur excessives l'hiver. Dans les serres jumelées, les ventilateurs peuvent être disposés alternativement à l'une puis l'autre extrémité pour améliorer la circulation de l'air et la distribution de la chaleur. Pour que le système donne une climatisation efficace dans les serres hermétiques (polyéthylène), il peut être nécessaire d'installer un ventilateur pour faire sortir l'air, plutôt que de laisser monter la pression statique dans la serre sans qu'il y ait déplacement d'air.

Autres techniques pour abaisser la température

On peut aussi rafraîchir une serre en réduisant le rayonnement solaire qui la frappe. Certaines couvertures thermiques partielles tamisent très bien les rayons du soleil. Le principal avantage d'une couverture thermique est qu'on peut la retirer rapidement quand l'insolation est faible (matin et soir). On peut encore tamiser les rayons du soleil en pulvérisant sur le revêtement un produit à cet effet. Les deux méthodes abaissent efficacement la température de l'air et des plantes dans la serre.

Les pompes à brouillard à haute pression (4 000 à 8 000 kPa) sont de plus en plus populaires en Amérique du nord. Elles sont activées par une minuterie ou un photostat et produisent un brouillard très fin. L'évaporation de petites particules d'eau refroidit l'air environnant, mais ne devrait pas causer de condensation sur le feuillage. Le système augmente donc l'humidité relative et on peut l'employer pour les jeunes plants qui demandent à la fois une intensité lumineuse élevée et une forte humidité relative.

D'autres techniques de climatisation, comme l'emploi de lattes de bois ou d'eau colorée coulant en permanence sur le toit de la serre, ne semblent pas avoir trouvé d'application commerciale.

CIRCULATION DE L'AIR

À cause des couvertures thermiques, il a fallu trouver d'autres moyens que le ventilateur de circulation traditionnel pour assurer la circulation de l'air. L'une de ces méthodes est celle du flux d'air horizontal qui est moins coûteuse au point de vue énergie. Les ventilateurs sont généralement plus petits (30 à 45 cm de diamètre) et ils exigent peu d'énergie (25 à 50 W) pour donner à l'air une vélocité linéaire de 10 à 12 m/min. Les moteurs à double fonction permanente donnent de bons résultats. Les ventilateurs doivent être disposés de façon à ce que l'air circule selon l'axe longitudinal de la serre.

On les place ordinairement à 5 m de l'extrémité, puis tous les 12 à 15 m dans chaque baie (5 à 8 m de large), à une hauteur de 2,5 à 3 m. D'une serre à l'autre, l'air doit circuler alternativement dans un sens puis dans l'autre. On trouvera des renseignements supplémentaires dans le bulletin "Connecticut Cooperative Extension Service Greenhouse Newsletter" # 125, 1985, intitulé *"Horizontal Air Flow"*.

HUMIDITÉ RELATIVE

L'absence d'appareils sûrs pour mesurer l'humidité explique pourquoi le contrôle de l'humidité relative (HR) laisse à désirer dans les serres. Avec l'introduction des ordinateurs, il est devenu moins compliqué d'utiliser les températures sèche et humide pour mesurer et, éventuellement, régler l'humidité relative dans la serre. Au cours des dix dernières années, on est parvenu à mieux comprendre le rôle de l'humidité relative en relation avec les autres facteurs climatiques dans la croissance des plantes. Pourquoi le taux d'HR est-il si important dans une serre ? Avant de répondre à cette question, il faut d'abord comprendre ce qu'est le taux d'HR et comment il est lié à la température de l'air.

L'humidité relative est le rapport entre la pression de la vapeur d'eau à un moment donné et la pression de la vapeur d'eau qui existerait si l'air était saturé d'humidité à la même température. Comme il existe une relation déterminée entre la pression de vapeur et la teneur en eau de l'air, on peut aussi utiliser la définition suivante: l'humidité relative est le rapport entre la quantité réelle de vapeur d'eau présente dans un certain volume d'air (humidité absolue) et la quantité maximum que ce même volume d'air peut contenir à la même température. Le taux d'HR est donc un pourcentage. Dans la plupart des serres, il varie entre 50 et 100%. La teneur réelle en vapeur d'eau (humidité absolue) de l'air à 18°C ainsi que divers taux d'HR sont indiqués à la table 6.

Table 6. Teneur en eau de l'air à 18°C pour diverses humidités relatives

Humidité relative	Teneur en eau
%	(g/m^3)
100	15,7
80	12,6
60	9,4
30	4,7

La quantité de vapeur d'eau que l'air peut contenir est liée à la température, comme le montre la table 7, et elle double presque quand la température augmente de 10°C.

Table 7. Effet de la température sur la teneur maximum en vapeur d'eau de l'air (saturation)

Température °C	Teneur en eau (g/m^3)
- 20	1,1
- 10	2,4
0	4,9
10	9,5
20	17,8
30	31,8

Si l'on chauffe ou refroidit l'air de la serre sans changer la quantité d'humidité présente, le taux d'HR baisse ou monte respectivement. Dans la plupart des cas, on peut dire en gros que le taux d'HR dans la serre descend de 4 à 6% chaque fois que la température monte d'un degré Celsius; l'inverse est également correct. Ces changements d'HR se produisent régulièrement avec l'alternance de régimes de température pour le jour et pour la nuit. Ainsi, beaucoup de producteurs augmentent la température d'environ 3°C au lever du soleil, ce qui réduit l'HR de 12 à 18 % et augmente la transpiration. Le soir, la baisse de température fait monter le taux d'HR et un peu de ventilation peut être nécessaire.

Quand l'air humide atteint son point de saturation, l'humidité vient se condenser sur les surfaces plus froides de la serre. Pendant la journée, les feuilles sont généralement plus chaudes que l'air ambiant mais la nuit, leur température peut tomber de 1 ou 2°C au-dessous de celle de l'air ambiant. Si le taux d'HR est proche de 95%, il peut facilement y avoir condensation sur la surface des feuilles. La sporulation fongique ou bactérienne est facilitée par la présence d'eau libre (Botrytis) ou même par un taux d' HR élevé pendant une durée prolongée (mildiou).

En dehors de la température, il y a d'autres phénomènes qui ont un effet sur le taux d'HR, comme par exemple l'évaporation provenant de la surface en culture, la transpiration des plantes étant plus importante que l'évaporation à partir du sol. Comme la conversion de l'eau liquide en vapeur absorbe de la chaleur, la transpiration contribue grandement à rafraîchir les plantes et l'air environnant. Le rythme de transpiration dépend beaucoup du taux d' HR dans l'air: une HR plus basse entraîne une plus grande différence de pression de vapeur entre la plante et l'air, ce qui fait augmenter la transpiration. Le mécanisme est le même pour le sol.

La quantité d'eau produite par évaporation et transpiration par la production intensive de concombres, de tomates, de chrysanthèmes ou de roses est considérable. Pour une culture ayant un indice élevé de couvert végétal (surface de feuillage par unité de surface), on estime que, dans des conditions optimales, elle atteint les 5 litres d'eau par mètre carré de serre en 24 heures. Les conditions sont dites optimales dans le cas d'une culture en pleine croissance avec un rayonnement visible suffisant, avec assez d'humidité pour les plantes, un taux d'HR d'environ 60 à 70 % et une température d'environ 20 à 25°C. La transpiration est à son maximum pendant le jour mais la transpiration nocturne n'est pas négligable (5 à 20 %). Pendant l'enracinement, on essaie de maintenir un taux d'HR élevé, avec la même température pour les feuilles et l'air, de façon à minimiser les pertes d'eau au niveau des boutures ou des plantules.

Le taux d'HR joue aussi un rôle important dans la morphologie de la plante, comme, par exemple, la grandeur et l'épaisseur des feuilles, des tiges et des fruits. La pression active provoque un agrandissement des jeunes cellules. Pour les cellules turgides, la pression dans la cellule est égale à la pression sur la paroi cellulaire. Comme la pression cellulaire augmente lorsque le taux d'HR est élevé, les cellules seront plus grandes et les parois cellulaires plus minces. En pratique, cela se traduit par des plantes molles et sans résistance. Le niveau souhaitable d'HR dépend du type de culture, mais aussi de la période de la journée. Prenons comme exemple le finissage des plantes en pots: on les endurcit en réduisant le taux d'HR dans la serre, ce qui les aide à supporter le transport et l'environnement chez le client.

Pour les tomates, il est important que le taux d'HR soit de 70-75 % pour permettre au pollen de bien se propager des anthères au stigmate.

Les échanges naturels d'air avec l'extérieur, surtout l'hiver, ont généralement pour effet d'abaisser l'HR alors que de l'air froid, à faible teneur en eau, remplace l'air chaud et humide (voir tables 6 et 7). Le régime de changement d'air dépend de l'étanchéité à l'air de la serre et de l'exposition au vent.

La relation complexe entre tous ces facteurs qui affectent le taux d'HR ainsi que la condensation (température, évaporation, transpiration et changements d'air) s'explique plus facilement par un exemple.

Supposons des conditions hivernales sans ventilation forcée, une température de serre de 18°C, un taux l'HR de 60 % et la présence d'une culture à maturité. Supposons encore un taux d'évaporation/transpiration de 1 L d'eau par mètre carré de serre par 24 heures (un cinquième du taux estival), dont 80 % sont produits pendant le jour (12 heures). Ceci signifie que les plantes produisent 66 g d'eau par heure et par mètre carré. Chaque

mètre carré de serre représente environ 4 m^3 d'air. L'humidité absolue va donc augmenter de 16,5 $g/m^3/h$ si le taux de transpiration demeure constant. De plus, si l'air de la serre (HR 60 % et 18°C, Table 6) contient 9,4 g d'eau par m^3, l'humidité absolue théorique de l'air serait de 25,9 g/m^3, alors que le point de saturation à 18°C est de 15,4 g/m^3.Cela voudrait dire que l'air serait sur-saturé, à moins que l'air humide ne soit remplacé par de l'air frais (plus sec) ou qu'il se produise de la condensation entre temps.

Pour les serres à revêtement simple, un taux de changement d'air d'un ou deux volumes par heure est normal. Pour les serres à revêtement double (polyéthylène double ou acrylique double, le taux normal est de 0,3 à 1,0 volume à l'heure). Pour cet exemple, prenons un volume d'air à l'heure, une température extérieure de 0°C et un taux d'HR de 50 %. L'humidité absolue est alors d'environ 2,4 g/m^3 pour l'air extérieur (Table 7). L'humidité absolue dans la serre serait donc de (25,9 + 2,4)/2 = 14,2 g/m^3, soit 95 % d'HR. Si le taux de changement d'air est plus bas, le taux d'HR monte à 100 % et s'il est plus haut, l'HR baisse, en supposant qu'il n'y a pas de condensation.

La condensation sur les surfaces intérieures de la serre peut extraire de l'air une quantité appréciable d'eau. Le taux de condensation dépend d'un grand nombre de facteurs comme , par exemple, le taux d'HR dans la serre, la température de la surface intérieure du recouvrement et la circulation de l'air dans la serre. À ce propos, il est important de noter que l'HR dans une serre à revêtement simple est ordinairement plus basse que celle d'une serre à revêtement double du fait que la température d'un revêtement simple est plus basse que celle de la paroi intérieure d'un revêtement double.

Les calculs ci-dessus démontrent que le taux d'HR dans une serre peut aisément atteindre 90 à 100 % en raison de la transpiration, même si les changements d'air naturels et la condensation éliminent une partie de la vapeur d'eau. Le taux optimal d'HR est de 70 à 80 % pour la plupart des cultures. Ce niveau permet une bonne transpiration et une croissance vigoureuse, tout en réduisant l'incidence des maladies. Dans les serres à parois doubles, le taux d'HR est plus souvent élevé pendant les mois d'hiver. Pour éliminer un excès d'humidité, on augmente la ventilation, mais ceci fait monter les coûts de chauffage. D'autres techniques, telles que les déshumidificateurs et les thermopompes sont à l'étude.

Le taux d'HR peut tomber excessivement bas quand de grandes quantités d'air sec pénètrent dans la serre. Cela peut se produire lors d'une journée ensoleillée du début de l'année. Il faut, à cette période, surveiller de près le cycle de refroidissement. Un excès de ventilation fait tomber rapidement le taux d'HR, ce qui risque de brûler les feuilles tendres. On peut, avec une pompe à brouillard, maintenir une HR élevée et éviter ce

genre de dommage aux plantes sensibles.

Pendant l'été, lorsqu'on a recours à la ventilation forcée, un taux élevé d'HR pose rarement de problèmes durant le jour, à moins que l'on ait un système de climatisation avec coussin de refroidissement. Durant la nuit, il est souvent nécessaire de ventiler ou de chauffer car, lorsque la température descend, il y a risque d'atteindre le point de rosée.

Figure 14. Régulateur de la teneur en gaz carbonique

GAZ CARBONIQUE

Dans le processus de photosynthèse, la plante absorbe du gaz carbonique (CO_2) de l'air pour produire les glucides (hydrates de carbone) nécessaires à la croissance de la plante. Ce processus n'a lieu qu'avec un rayonnement lumineux suffisant. Par suite de l'absorption par les plantes, le niveau de CO_2 dans la serre peut tomber au-dessous du niveau ambiant, surtout si les échanges d'air avec l'extérieur sont limités. La teneur en CO_2 de l'air extérieur est d'environ 340 ppm en volumes et elle peut descendre dans la serre à 150 à 200 ppm (une réduction de 10 à 20 %), ce qui affecte la production de matière organique sèche. Ceci peut se produire quand il n'y a pas de ventilation mais aussi quand la ventilation fonctionne. Il se peut qu'un supplément de CO_2 résolve le problème économiquement, mais chaque situation doit être évaluée individuellement. On doit envisager l'addition de CO_2 à l'air ambiant (340 ppm) au printemps et à l'automne (ventilation modérée).

Il a été démontré par des études que la croissance des plantes est améliorée (de 15 à 20 %) quand on augmente la teneur en CO_2 à 800 -1 300 ppm dans la serre pendant le jour. Il faut noter que le supplément à donner dépend aussi de la circulation d'air dans la serre. On peut dire qu'en général le taux optimal de CO_2 est plus bas (1 000 ppm) quand la ventilation est plus grande. En Ontario, la plupart des serriculteurs qui produisent à l'année longue introduisent un supplément de gaz carbonique dans leurs serres et se servent de régulateurs (Figure 14) pour maintenir la teneur à un certain niveau. Certains régulateurs sont à double réglage: un pour le niveau de gaz carbonique supplémentaire à certaines heures, l'autre pour le niveau minimum à maintenir en tout temps.

Il existe plusieurs façons d'ajouter du CO_2 dans la serre, la plus courante étant la combustion de gaz naturel, de propane ou de kérosène à faible teneur en soufre. La combustion a lieu dans des appareils spéciaux, disposés aux endroits appropriés dans la serre. Selon la saison, la chaleur dégagée par ces appareils peut ou non être un avantage.

Le gaz carbonique liquide est le plus utilisé malgré qu'il soit moins économique pour les petites exploitations. Il présente les avantages suivants: un meilleur contrôle des quantités, une meilleure pureté, l'absence de dégagement de chaleur et la possibilité de l'utiliser près du feuillage de la plante.

Le supplément nécessaire de gaz carbonique dépend beaucoup du régime d'infiltration d'air extérieur dans la serre. La fiche technique *"Carbon Dioxide in Greenhouses"*, Agdex 290/27, du MAAO, contient des informations sur les capacités des brûleurs et l'addition de gaz carbonique liquide pour différentes serres. Cette fiche technique traite aussi d'autres aspects comme la distribution du gaz, les coûts et les dangers associés à une combustion incomplète.

LUMIÈRE ET ÉCLAIRAGE SUPPLÉMENTAIRE

La lumière est le facteur le plus important dans la production en serre. C'est la lumière qui fournit l'énergie pour la conversion du gaz carbonique et de l'eau en glucides dans les plantes (photosynthèse). Ces glucides sont l'élément de base de la vie végétale et, en général, de notre chaîne alimentaire. Seulement 10 % de l'énergie lumineuse que nous recevons du soleil est employée pour la respiration et la croissance. La table 8 donne les quantités d'énergie radiante reçues du soleil par une surface horizontale, au sud de l'Ontario.

Table 8. Rayonnement global mesuré à la station de Vineland (moyennes de 5 ans)

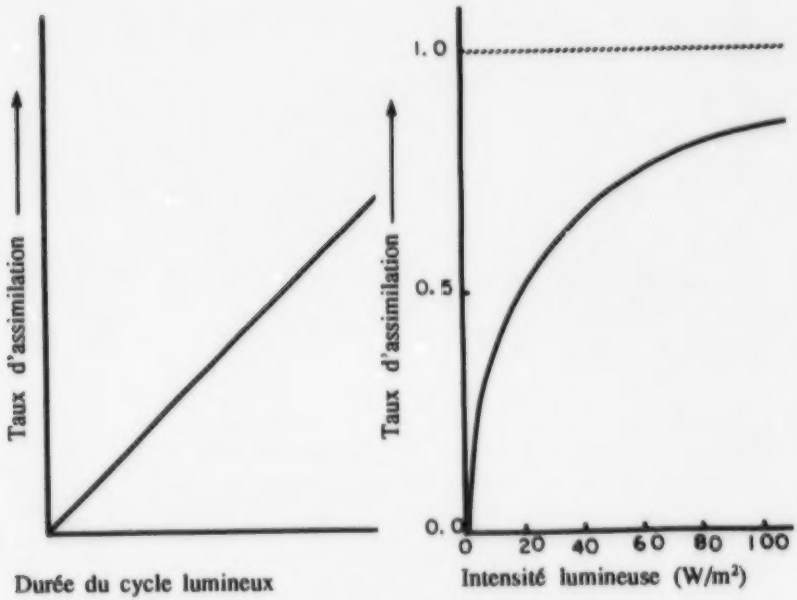
	Rayonnement quotidien moyen (J/cm^2/jour) (1)	Durée moyenne d'une journée (heures) (2)	Rayonnement photosynthétique actif (RPA) dans la serre (W/m^2) (3)
Janvier	427	9,3	38,2
Février	804	10,5	63,8
Mars	1274	12,0	88,4
Avril	1617	13,5	99,8
Mai	2081	14,7	117,9
Juin	2250	15,5	120,9
Juillet	2145	15,2	117,5
Août	1823	14,0	108,5
Septembre	1383	12,6	91,4
Octobre	855	11,0	64,7
Novembre	500	9,7	42,9
Décembre	403	8,9	37,7

La colonne (1) indique le rayonnement quotidien total pour chaque mois. Ce rayonnement moyen reçu comprend la partie visible ainsi que la partie invisible du spectre. Les mois d'été fournissent cinq fois plus d'énergie que les mois d'hiver. La colonne (2) donne la durée moyenne d'une journée (période écoulée entre le lever et le coucher du soleil) pour chaque mois. La journée la plus courte est en décembre (8,8 h) et la plus longue en juin (15,6 h), la durée moyenne d'une journée changeant de 3 minutes par jour.

Pour calculer le rayonnement photosynthétique actif (RPA) dans une serre, on suppose que 50 % du rayonnement total est reçu dans la bande visible (0,4 à 0,7 microns) et qu'environ 60 % de ce rayonnement atteint les plantes. Il faut rappeler que ces chiffres représentent une moyenne d'intensité lumineuse, obtenue en divisant l'intensité diurne totale par le nombre d'heures. En réalité, la luminosité augmente du lever du soleil jusqu'à son zénith (vers midi), puis diminue jusqu'à son coucher.

L'hiver, c'est souvent la lumière qui limite la production en serre. Toutefois, la relation entre la luminosité et le rendement de la serre n'est pas simple. Il faut tenir compte des facteurs ci-dessous.

Influence de la durée du cycle lumineux et de l'intensité lumineuse sur l'assimilation du gaz carbonique



Graphique 1. Relation entre la durée du jour ou l'intensité lumineuse (RPA) et le taux d'assimilation (d'après le Dr. O. Elgersma et le Dr. Philips, Pays-Bas).

On voit (Graphique 1) que le taux d'assimilation est directement proportionnel à la durée du cycle lumineux. Une durée d'exposition de huit heures produira deux fois plus de produits d'assimilation qu'une durée de quatre heures, en autant que l'intensité lumineuse soit constante. Pour ce qui est de la relation entre le taux d'assimilation et la quantité de rayonnement photosynthétique actif, les bénéfices diminuent progressivement. Ainsi, le rendement des premiers 10 W/m² est supérieur à celui obtenu en augmentant l'intensité de 20 à 30 W/m². Ceci signifie que l'efficacité de conversion de la lumière est plus élevée aux faibles intensités lumineuses des premières heures de la matinée qu'à celles du midi.

Rapport entre l'intensité lumineuse et le feuillage

Il existe un rapport évident entre la grandeur des feuilles et l'intensité lumineuse, surtout dans le cas de jeunes feuilles en croissance durant les périodes de faible intensité lumineuse. Certaines expériences ont montré qu'une intensité lumineuse réduite pendant un certain temps se trouve partiellement compensée par une plus grande surface de feuillage, sans que le taux de photosynthèse par unité de surface ne soit affecté. Des feuilles plus grandes interceptent mieux la lumière au profit de la plante, ce qui améliore l'efficacité de conversion totale de la plante. Les feuilles sont généralement minces et faibles. Les feuilles produites sous une intensité lumineuse élevée ont d'ordinaire une cuticule plus épaisse (les chloroplastes étant alignés parallèlement au rayonnement solaire, ce qui est inefficace) que les feuilles produites sous une intensité lumineuse faible (chloroplastes perpendiculaires au rayonnement lumineux). Bien que les plantes soient capables de s'adapter à une luminosité plus faible, cette adaptation dépend de l'âge des plantes (et des feuilles) et de la durée de la période d'acclimatation. Ceci explique pourquoi les plantes cultivées au printemps sont plus grosses que les plantes cultivées en automne, même si la quantité de lumière reçue est la même dans les deux cas.

Effet du feuillage. La lumière est réfléchie, absorbée et transmise par chacune des feuilles et c'est seulement une fraction de l'énergie lumineuse qui est convertie en glucides. La superposition de plusieurs feuilles rend la conversion plus efficace pour l'ensemble des plantes. L'indice de couverture feuillue (surface de feuilles par unité de surface au sol) est d'environ 4 à 6 m^2/m^2 pour la plupart des cultures à maturité. De plus, les jeunes feuilles sont normalement plus efficaces que les plus vieilles pour ce qui est du rendement photosynthétique net (photosynthèse brute moins respiration). Les producteurs profitent de cette particularité en gardant les jeunes feuilles du haut de la plante (tomates et concombres) de façon à bénéficier au maximum de l'intensité lumineuse au-dessus du feuillage.

La relation qui existe entre l'intensité lumineuse ou la durée d'exposition et la feuille individuelle ne s'applique pas à l'ensemble de la plante. Les variations des facteurs climatiques (température, HR et CO_2) au cours de la saison ont aussi un effet sur les résultats. Bien qu'il soit délicat de donner des chiffres valables pour toutes les plantes, on estime que les récoltes d'hiver (1er oct.-1er avril) produisent la moitié des récoltes d'été (1er avril-1er oct.). La quantité totale de lumière reçue pendant la période d'hiver n'est qu'à peu près un tiers de celle reçue pendant la période d'été. Les producteurs essaient d'augmenter leur production d'hiver en faisant appel à des lampes à haute intensité pour augmenter l'intensité lumineuse diurne et pour allonger la durée du jour.

On fournit ainsi de la lumière supplémentaire durant l'hiver aux roses,

chrysanthèmes, géraniums, violettes africaines, bégonias Rieger et aux oeillets ainsi qu'aux tomates et aux plants de concombres. Les lampes à haute pression sodium constituent la source lumineuse la plus courante à cause de leur efficacité à convertir l'électricité en rayonnement visible, de l'avantage de leur bande de longueurs d'ondes et de leur longévité. L'intensité lumineuse fournie peut être modulée selon les besoins des plantes. Les applications commerciales avec lampes à haute pression sodium varient de 20 à 80 W/m² de puissance installée. À titre d'avantage supplémentaire, la facture de chauffage se trouve aussi réduite. Les lampes à basse pression sodium, dont le rendement est légèrement supérieur, ont été essayées dans diverses situations mais ne se prêtent pas à l'usage en serre, leur lumière étant monochromatique. En Europe, des lampes aux halogénures de métal sont souvent utilisées pour la production de plants de tomates et de concombres pendant l'hiver mais leur rendement plus faible et leur courte longévité les rendent moins populaires ici.

Pour de plus amples renseignements sur l'emploi d'éclairage supplémentaire et son application à diverses cultures, voir les fiches techniques du MAAO, *"Commercial Applications of Supplementary Lighting in Greenhouses" et "Supplementary Lighting in Greenhouses"*, Agdex 290/717.

On utilise aussi l'éclairage supplémentaire en serre pour provoquer ou retarder la floraison. Pour les plantes adaptées à un cycle lumineux court (chrysanthèmes, bégonias Rieger, kalanchoes, poinsettias, etc.), on peut se servir de l'éclairage en hiver pour allonger la durée du jour et tenir les plantes à l'état végétatif. Pour les plantes adaptées à un cycle long (oeillets, gypsophiles), l'éclairage supplémentaire provoquera la floraison. On emploie généralement des lampes incandescentes (lumière rouge) à une puissance installée de 20 W par m² de surface au sol. Les lampes sont ordinairement allumées de 22 heures à 2 heures et elles fournissent une intensité de 70 à 100 lux au niveau des plantes. Pour économiser de l'électricité, on peut éclairer de façon cyclique: les lampes ne sont allumées que six minutes sur 30, avec les mêmes résultats. Ce genre d'éclairage supplémentaire n'est pas considéré comme ayant un effet sur la photosynthèse et il n'est employé que pour régir la floraison de certaines plantes.

4. RÉGIE DU CLIMAT DE LA SERRE

La productivité des cultures en serre dépend largement d'une régie appropriée des facteurs climatiques, comme la température de l'air, des plantes et du sol, l'humidité relative (HR), le taux de gaz carbonique, l'éclairage, l'irrigation, l'ombrage, etc.

La régie des facteurs climatiques suppose trois éléments:

- un appareil de régulation

- un ou des appareil(s) de détection
- l'équipement climatique proprement dit.

Les détecteurs mesurent le niveau réel d'un paramètre donné (température, CO_2, HR) et passent le signal au régulateur qui détermine alors si l'équipement climatique (ventilation, mélangeurs, etc.) doit être mis en action. En général, le niveau d'un paramètre donné évolue de façon plus ou moins sinusoïdale et l'objectif est d'obtenir dans la serre une moyenne égale au niveau pré-déterminé. Il est également important que l'opération s'effectue avec une intervention minimale de l'équipement climatique.

APPAREILS DE RÉGULATION

Le régulateur est l'élément central qui prend les décisions critiques pour la régie du climat dans la serre. On trouvera ci-dessous une explication des divers types de régulateurs, la température de l'air étant utilisée comme exemple.

Régulateurs intermittents. Ces appareils peuvent envoyer deux signaux: l'un pour allumer le chauffage si la température est trop basse; l'autre pour l'éteindre si la température est trop haute. La plupart des thermostats fonctionnent sur une marge de température que l'on peut régler manuellement. Si la marge de température est faible, le chauffage démarre très fréquemment mais pour un temps très bref. Si la marge est grande, le chauffage démarre moins souvent, mais pour un temps plus long. Les fluctuations de la température dépendent aussi de la capacité du système de chauffage ainsi que de la température extérieure et l'on doit régler la marge pour chaque cas particulier.

Régulateurs à modulation. On les emploie pour régir des quantités, comme par exemple pour régler un mélangeur en mode pulsatif, pour prolonger le temps de correction et éviter les dépassements. Ils sont particulièrement utiles pour les systèmes de chauffage à eau chaude.

Régulateurs proportionnels. Ces appareils émettent un signal proportionnel à la déviation du point pré-déterminé; plus grande est la déviation, plus grande la correction (ouverture des panneaux, des mélangeurs). On emploie souvent ces régulateurs avec des mélangeurs ou des régulateurs de pression. On parle fréquemment de la bande P (bande proportionnelle) de ces appareils; pour un panneau, c'est la gamme de températures allant de la fermeture totale à l'ouverture totale. Plus la bande P est étroite et plus souvent les panneaux seront ouverts ou fermés. En pratique, on recommande une bande P large par temps froid et une bande P étroite par temps chaud.

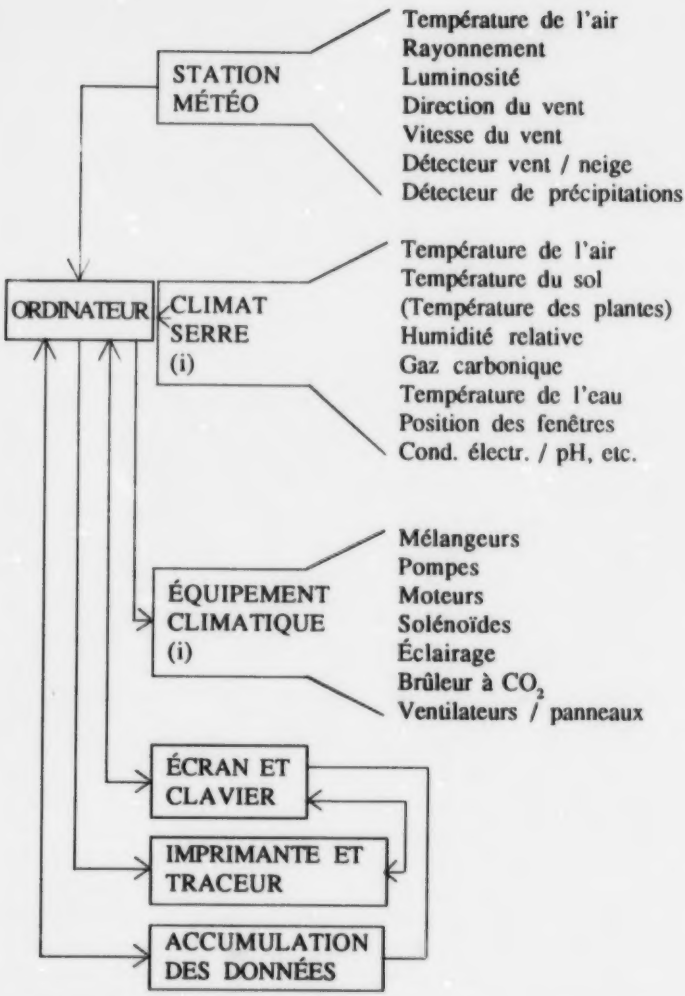
Régulateurs proportionnels / intégraux (P.I.). Avec les régulateurs proportionnels, il est possible de trouver une différence entre la température réelle (T_r et la température choisie (T_c). Cette différence s'appelle déviation statique. Les régulateurs P.I. la minimisent en variant également le **régime** auquel le régulateur (vanne, ventilation) doit changer. Ce régime est directement proportionnel à la déviation du point pré-déterminé: plus grande est la déviation de T_c, plus rapides sont les pulsations pour ouvrir ou fermer la vanne. Avec un régulateur P.I., la déviation statique devient négligeable, de sorte que T_c est égal à T_r.

Les régulateurs P.I. sont généralement les plus avancés et le programme de régulation peut dépendre des conditions extérieures comme la lumière, la vitesse du vent, la température, etc.

Régulation par ordinateur. Pour avoir un système qui fonctionne comme un régulateur P.I. et communique avec toutes les différentes fonctions de l'équipement climatique (minimum et maximum, relation au temps, relation à la lumière, etc.) en intégrant les divers paramètres, il faut avoir recours à l'ordinateur. L'appareil peut effectuer simultanément de nombreuses fonctions régulatoires pour de nombreux climats, alors que les conditions extérieures ne sont mesurées qu'une fois par cycle de mesure. Le cycle de mesure varie avec le type d'ordinateur et avec la fonction de régulation qu'il doit effectuer. Pour la régulation du climat, un cycle de mesure de 20 à 30 secondes peut suffire, alors que pour la conductivité électrique et le pH de l'eau d'irrigation, le cycle peut être d'une ou deux secondes. L'ordinateur permet aussi d'enregistrer et d'imprimer des données et de comparer les mesures réelles aux niveaux pré-déterminés.

Dans un système de chauffage à l'eau chaude, on peut non seulement régler la température de l'air, mais encore celle de l'eau dans les conduits. Il est possible de moduler la température de l'air par rapport au lever et au coucher du soleil, à la luminosité ou au rayonnement solaire total quotidien ou hebdomadaire. La température de l'eau à la sortie de la chaudière ou à l'entrée des conduits peut être modifiée en fonction de la lumière, de la ventilation, de l'humidité relative ou d'un minimum et d'un maximum de température. S'il y a deux systèmes de chauffage ou plus, chacun d'eux peut être réglé indépendamment, de sorte qu'il est possible de les faire fonctionner en parallèle, en série ou indépendamment, avec chacun son réglage.

Les possibilités sont infinies et adaptables aux besoins de l'utilisateur. Le graphique 2 propose un schéma pour un système avec ordinateur.



Graphique 2. Vue shématique d'un régulateur avec ordinateur.

Il existe essentiellement deux approches à la régulation du climat d'une serre par ordinateur: le système à satellites et le système centralisé. Dans le système à satellites, on a un petit ordinateur pour une ou deux zones climatiques et toutes les fonctions de régulation sont effectuées à partir de là. Un ordinateur central de communications fournit aux satellites les données climatiques extérieures et reçoit les données pour les conserver ou

les imprimer. Toutes les communications se font par un seul jeu de câbles auxquels sont branchés tous les satellites. Dans le système centralisé, tous les signaux d'entrée et de sortie passent par un seul point. Cela prend davantage de câbles mais l'entretien et le diagnostic sont généralement plus faciles.

APPAREILS DE MESURE

En ce qui concerne les détecteurs (ou capteurs), il faut tenir compte des conditions dans lesquelles ils doivent fonctionner (humidité, poussière, pesticides, etc.) de même que des paramètres qu'ils ont à mesurer.

Chacun des appareils de mesure doit être précis et rapide, cette dernière caractéristique étant particulièrement importante du fait que la plupart des paramètres changent constamment et quelquefois très rapidement (distribution d'engrais dans l'eau d'irrigation). Pour chaque paramètre, il existe plusieurs appareils:

Température: On connaît trois systèmes mécaniques, les thermostats à bimétal (cuivre/acier), à liquide et à vapeur de liquide. Les trois types utilisent le principe de l'expansion d'un matériau à la chaleur.

Dans les régulateurs électroniques, on utilise des appareils qui changent de résistance électrique avec la température; les plus communs sont les thermistors. Ces instruments sont petits, durables et ils produisent de grands changements de résistance quand la température change. Les appareils au platine (PT 100 et PT 1000) ont aussi une résistance qui change avec la température. On les emploie souvent pour mesurer la température de l'eau à l'intérieur d'un tuyau.

Les thermocouples sont constitués de deux fils conducteurs soudés ensemble à une extrémité, les deux fils étant d'un métal différent (par exemple, cuivre/constantan). La différence de voltage entre les deux fils est proportionnelle à la température. Dans la plupart des cas, il faut corriger la lecture pour tenir compte des fils qui relient le capteur (sonde) à l'instrument de mesure ou de régulation.

Humidité relative: On mesure souvent l'humidité relative à l'aide d'un faisceau de cheveux dont la longueur varie avec la pression de la vapeur d'eau dans l'air. Ceci peut se faire mécaniquement ou par l'intermédiaire d'une résistance électrique. Ce genre d'hygromètre souffre rapidement des conditions ambiantes dans la serre (poussière, graisse, pesticides, etc.), si bien qu'il faut continuellement les nettoyer et les re-calibrer. Une seconde méthode consiste à mesurer les températures "sèche" et "humide" (psychromètre). L'appareil utilise un thermomètre recouvert d'un manchon de coton tenu constamment humide avec de l'eau distillée provenant d'un réservoir. Le mouvement de l'air forcé (2m/s) le long du manchon

provoque une évaporation et donc une baisse de la température. On se sert de cette baisse de température par rapport à la lecture du thermomètre sec pour déterminer le degré d'HR. Les psychromètres sont utilisés par les fabricants de systèmes climatiques informatisés pour serres. D'autres instruments mesurent les changements de résistance électrique dûs à l'absorption d'humidité mais leur application est limitée aux endroits où l'humidité relative est fréquemmemt élevée.

Gaz carbonique: Les instruments pour mesurer le gaz carbonique sont populaires depuis une dizaine d'années. Leur principe de mesure est fondé sur le fait que les molécules de gaz carbonique absorbent les rayons infrarouges dans une certaine bande de longueurs d'ondes. Des échantillons d'air provenant de la serre passent dans la cellule photoélectrique et leur teneur en CO_2 est comparée au niveau choisi. Pour pallier le coût du détecteur à infrarouge, on combine souvent par multiplexeurs une cellule unique à plusieurs sondes pour mesurer le niveau de CO_2 dans plusieurs compartiments.

Lumière: L'industrie horticole fait usage de trois types de détecteurs de lumière (fluxmètres) qui diffèrent par les longueurs d'ondes auxquelles ils sont sensibles.

Détecteurs de lumière, Ces photomètres sont le plus sensibles dans la partie jaune du spectre.Cette sensibilité diminue en allant vers le bleu et vers le rouge. Les mesures sont données en lux ou en pieds-chandelles (1 pied-chandelle = 10,76 lux).

Détecteurs de rayonnement La mesure du rayonnement est fondée sur le fait que des rayons de longueurs d'ondes différentes provoquent des réactions thermiques différentes. Des stations météorologiques dans le monde entier utilisent des détecteurs "Kipp and Zonen" pour mesurer le rayonnement global. Ces détecteurs mesurent le rayonnement solaire reçu, dans la bande de 0,2 à 15 microns. Ils sont gradués en W/m^2 ou en J/cm^2/jour. Une partie seulement de ces rayons (environ 50 %) se trouve dans la bande visible (rayonnement photosynthétique actif, RPA).

Détecteurs de quantum Les détecteurs de quantum sont en usage courant dans la communauté scientifique nord-américaine. Ces instruments mesurent la quantité d'énergie reçue dans la bande de 0,4 à 0,7 microns, imitant la sensibilité des plantes au rayonnement visible du point de vue de la photosynthèse. Une bonne corrélation a été identifiée entre la croissance des plantes et les quanta. L'unité de mesure est le microEinstein par mètre carré par seconde ($uE/m^2/s$).

Les corrélations entre les différents instruments dépendent largement de la distribution spectrale de la source lumineuse (Table 9).

Table 9. Conversion de Watts par mètre carré (0,4 à 0,85 microns) en pieds-chandelles, en lux, ou en micro Einsteins par mètre carré par seconde (0,4 à 0,7 microns) pour diverses sources lumineuses.

Source	Lux/W/m²	uE/m⁻²/s⁻¹ par W/m²
Lumière du jour	183	3,4
Incandescente	116	2,3
Fluorescente		
Blanc froid	334	4,5
Blanc chaud	350	4,6
HAUTE INTENSITÉ		
Mercure	356	4,2
Halogénure de métal	292	4,1
Haute pression sodium	296	3,6
Basse pression sodium	459	4,3

Pour les pieds-chandelles, diviser les lux par 10,7

Données de rayonnement mesurées par R. W. Thimijan

Figure 15. Thermostat dans une boîte ventilée, placé en un point représentatif.

Les instruments de mesure pour la température et l'humidité relative doivent être protégés de l'influence du rayonnement extérieur et des courants d'air secondaires. Il faut donc les placer dans une boîte aspirante, en un point approprié de la serre (Figure 15) où sont les plantes. Un petit ventilateur fait continuellement passer de l'air dans la boîte pour donner un échantillon plus représentatif. On doit calibrer les détecteurs de température au moins deux fois par an, à l'aide d'un thermomètre précis. Le tube d'échantillonnage de gaz carbonique doit être situé dans le feuillage alors que les fluxmètres sont ordinairement disposés à l'extérieur de la serre, dans un endroit sans ombre.

ÉQUIPEMENT DE CLIMATISATION

Il s'agit du matériel électrique qui effectue les changements demandés par le régulateur: panneaux, mélangeurs, ventilateurs, génératrices de gaz carbonique, déshumidificateurs, solenoïdes, etc. La capacité de l'équipement et le régime auquel il fonctionne déterminent le temps de réaction pour un paramètre donné. Les panneaux ou les mélangeurs à réaction lente permettent aux détecteurs de suivre les changements qui se produisent dans le climat de la serre ce qui, en évitant les oscillations excessives, est particulièrement important pour les régulateurs P.I.. Les potentiomètres sont très utiles pour contrôler la position d'un panneau, un mélangeur ou l'ouverture d'une couverture thermique. On les emploie souvent avec les régulateurs analogues ou à ordinateur.

Un système efficace de régulation de la température doit être muni de commandes de priorité et de systèmes d'alarme. Les commandes de priorité peuvent être manuelles ou consister en un autre système automatique. Au cas où un problème se produirait dans les systèmes de chauffage ou de climatisation, il faut pouvoir fonctionner manuellement. Il est indispensable d'avoir des systèmes de secours pour le chauffage ou la climatisation et leur mise en marche doit être automatique lorsque la température excède une limite donnée. Si l'on s'attend à des hygrométries excessives, ou si les cultures envisagées supportent mal les humidités élevées, on pourra prévoir pour l'humidité relative une commande de priorité qui mettra en oeuvre une combinaison de chauffage et de ventilation. Il existe bien des sortes de systèmes d'alarme. En général, ils sont reliés au niveau d'eau dans la chaudière, au fonctionnement de la chaudière et à la température dans la serre. S'il se produit une panne, le système peut déclencher une sonnerie, envoyer un signal d'alarme à la résidence du serriculteur ou faire sonner un ou plusieurs téléphones. Le système d'alarme doit se déclencher dès que les limites sont atteintes. Il est important de ne pas fixer des limites à des niveaux trop bas car il pourrait bien être trop tard pour corriger la situation avant que les plantes ne soient

endommagées. En plus des systèmes d'alarme et des commandes de priorité, on utilise aussi les ordinateurs pour enregistrer continuellement la température et, si l'on veut, l'humidité relative (Figure 16), ce qui est essentiel pour vérifier que les régulateurs fonctionnent bien.

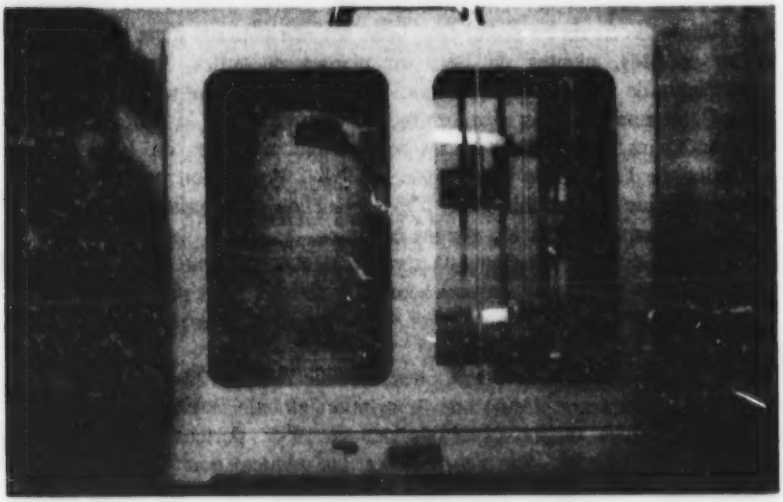


Figure 16. Appareil enregistrant les variations de température et d'humidité relative sur une base hebdomadaire.

5. COÛTS ET REVENUS

Il est difficile d'estimer les coûts et les revenus pour une opération de serre moyenne à cause de la diversité des cultures en serres et des régimes de production dans la province. Dépenses et revenus dépendent grandement du cycle choisi (culture de printemps seulement ou de printemps et d'automne) et de l'époque de la plantation. Une plantation précoce entraîne des coûts de main-d'oeuvre et de combustible plus élevés, mais probablement des rendements plus élevés. Le plus récent rapport, publié en février 1980, sur les coûts de production pour les tomates et les concombres de serre a été préparé par une firme d'experts financiers pour l'Office de mise en marché des producteurs de légumes de serre de l'Ontario. Les principales dépenses étaient la main-d'oeuvre (22 %) et l'énergie (21 %), le classement et l'emballage(12%).

L'Office de mise en marché des producteurs de légumes de serre de l'Ontario, à Leamington, régit les conditions de vente pour les serriculteurs. Elle fixe, chaque semaine, les prix minimaux pour les légumes et il est

illégal de vendre au-dessous de ces prix. Un rapport sur les rendements physiques et économiques et sur la distribution géographique de la production de légumes en serre a été préparé par G. A. Fisher, Direction de l'économie, MAAO (1984).

Il est encore plus difficile de donner une analyse typique des coûts pour une culture de fleurs en serre. On classe les serriculteurs dans la catégorie fleurs coupées, plantes en pots ou plantes annuelles, mais bien des producteurs de fleurs produisent aussi une récolte de légumes au printemps ou à l'automne. La plus récente étude économique sur la production des chrysanthèmes, des oeillets et des roses a été préparée en 1976 par la Direction de l'économie (Greenhouse Flower Production in Ontario, par Fisher, Davies et McKibbon). Il n'existe aucune information détaillée sur les plantes annuelles ou les plantes en pots.

Les ventes en floriculture ne sont régies par aucune législation. Les gros producteurs agissent souvent comme grossistes et les petits producteurs vendent aux grossistes ou au "marché aux fleurs" (Ontario Flower Growers Cooperative Ltd.) à Mississauga.

Le rapport annuel de Statistiques Canada, numéro 22-202, *L'industrie des cultures en serre*, donne une description globale, à jour et chiffrée de l'industrie. Ces rapports, publiés depuis 1955, portent surtout sur la structure du marché, les dépenses et les ventes pour l'ensemble de l'industrie.

6. FOURNISSEURS POUR SERRES

	R					Advanced Greenhouse Ltd., 440 rue Philip, Waterloo, Ontario N2L 5R9 519/885-1170
S			I	E		Ball-Superior Ltd., 1155 Birchview Dr., Mississauga, Ontario L5H 3E1 416/278-5201
			I			BFG Supply Company, 14500 Kinsman Road, Burton, OH USA 44021 216/834-1883
S		C	I		O	Paul Boers Greenhouse Construction Boîte postale 134, R.R. 81 St.Davids, Ontario L0S 1P0 416/262-4911; Télex 061-5344
S						Campbell-O'Brien Limited 348, rue Guelph Georgetown, Ontario L7G 4B5 416/877-0129
				E		Canadian General Electric Company Ltd. 505 avenue Woodward, Hamilton, Ontario L8H 7J6 416/781-1511
S						DeCloet Ltd. Boîte postale 145 Tillsonburg, Ontario N4G 4H3 519/842-7361
					O	Cravo Equipment Ltd. Boîte postale 1091 Brantford, Ontario N3T 5S7 519/759-8220; Télex 061-812189
S						Growers Greenhouse Suppliers Boîte postale 83 Vineland Station, Ontario L0R 2E0 416/562-7341

	R		I		O	Growers Technical Services Ltd. 2241 Dunwin Dr., Mississauga, Ontario L5L 1A3 416/828-5925; Télex 065-22418
				E		GTE Sylvania Canada Limited 35 Vulcan Road Rexdale, Ontario M9W 1L3 416/247-6171
		C				Heat Rite Industries Inc., Boîte postale 5 298 sud, rue Victoria Centralia, Ontario N0M 1K0 519/228-6101
S						Ickes-Braun Greenhouses of Canada Ltd. Boîte postale 2000 90 Bartlett Road Beamsville, Ontario L0R 1B0 416/563-8276
S						Jacobs Greenhouses Mfg., Ltd. 371 Talbot Road Delhi, Ontario N4B 2A1 519/753-5644
S	R	C			O	Frank Jonkman & Sons Ltd. R.R. 4 Bradford, Ontario L3Z 2A6 416/775-5353
	R					Lander Control Systems Inc. R.R. 1 Orangeville, Ontario L9W 2Y8 519/941-3258
		C				Mac-Wood Machine Ltd. 17 avenue Sheard Brampton, Ontario L6Y 1J3 416/451-0244
		C				Maynard Alternate Fuels Boîte postale 352 Schomberg, Ontario L0G 1T0 416/939-2261

			I			Metex Corporation Limited 12 Penn Drive, Unit 1 Weston, Ontario M9L 2A9 416/749-1210; Télex 065-27273
		C	I			Niagara Plumbing Supply Co. Ltd. 5605, rue Stamford Niagara Falls, Ontario L2E 6T7 416/354-7424; Télex 061-5477
				E		Philips Electronics Ltd. 601 avenue Milner Scarborough, Ontario M1B 1M8 416/292-5161; Télex 065-25100
				E		P.L. Light Systems Canada Inc. Boîte postale 206 183 South Service Road, Unit 2 Grimsby, Ontario L3M 4G3 416/945-4133
	R					Plantech Control Systems Boîte postale 1179 R.R. 81 Beamsville, Ontario L0R 1B0 416/563-4276
			I			Plant Products Co. Ltd. 314 Orenda Road Bramalea, Ontario L6T 1G1 416/793-7000; Télex 06-97595
		C				Roberts Gordon Appliances Corp. Ltd. 241 South Service Rd. W. Grimsby, Ontario L3M 1Y7 416/945-5403
	R					Roger Control Systems Inc. Boîte postale 231 Hannon, Ontario L0R 1P0 416/383-6771
	R					Valera Electronics Inc. 1729, boulevard St.Laurent Ottawa, Ontario N2L 5B5 613/526-1660; Télex 053-4899

S						Vanhof & Blokker Ltd. 6745 Pacific Circle Mississauga, Ontario L5T 1N8 416/673-0822
S					O	Van Rijn Enterprises Ltd. 429 Dewitt Road, Unit 6 Stoney Creek, Ontario L8E 4C3
S		C				Vary Industries Boîte postale 160 317 South Services Rd., W. Grimsby, Ontario L3M 4N6 416/945-9691; Télex 061-5436
S			I	E	O	Westbrook Greenhouse Systems Boîte postale 99 330 Main St. W. Grimsby, Ontario L3M 4G1 416/945-9611; Télex 061-5291
			I			Peter Zwart & Associates Boîte postale 235 Grimsby, Ontario L3M 4G3 416/643-2507

Codes:

S - Serres
R - Régulateurs
C - Chauffage
I - Irrigation
E - Éclairage
O - Rideaux d'ombrage et couvertures thermiques

7. RÉFÉRENCES

1. *Carbon dioxide in Greenhouses.* T.J. Blom, W.A. Straver et F.J. Ingratta. MAAO, Fiche technique, Agdex 290/27.
2. *Commercial application of supplementary lighting in greenhousees.* J. Hughes, M.J. Tsujita et D.P. Ormrod. MAAO, Fiche technique, Agdex 290/717.
3. *Energy conservation in Ontario greenhouses.* T.J. Blom, J. Hughes et F.J. Ingratta, MAAO, Publication 65.
4. *Greenhouse flower production.* 1976. G.A. Fisher, L.L. Davies et E.D. McKibbon. Coûts de production et revenus pour les chrysanthèmes, les oeillets et les roses, 1974. Direction de l'économie, MAAO.
5. *L'industrie des cultures en serre.* Statistiques Canada, Ministère des Approvisionnements et des Services, Ottawa, août 1984.
6. *Greenhouse vegetable production recommendations.* MAAO, Publication 365.
7. *Greenhouse vegetable production in Ontario.* H. Tiessen, J. Wiebe et J.C. Fisher. MAAO, Publication 526.
8. *Greenhouse vegetable statistics.* 1984. G.A. Fisher. Direction de l'économie, MAAO, Chatham, Ontario. Surfaces cultivées, rendements et revenus pour l'Ontario.
9. *Horizontal air flow.* Jay Koths et John Bartok. Édition spéciale de la circulaire sur les serres, # 125, 1985. Université du Connecticut, Department of Agricultural publications U-35, Room 223, 1376 Storrs Road, Storrs, CT 06268.
10. *Pesticide recommendations for greenhouse ornamentals.* MAAO, publication bisannuelle 381.
11. *Supplementary lighting in commercial greenhouses.* M.J. Tsujita et D.P. Ormrod. MAAO, Fiche technique, Agdex 290/717.

Les publications 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10 et 11 sont disponibles à votre bureau de comté et à la Direction de l'information, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Ontario, 801 Bay Street, Toronto, Ontario M7A 1A5.